

Université Lumière Lyon II
Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université Lyon II
en Sciences de l'éducation
présentée et soutenue publiquement par
Jacques VINCE
le vendredi 6 octobre 2000

Approches phénoménologique et linguistique des connaissances des élèves de 2^{nde} sur le son

préparée sous la direction d'Andrée Tiberghien,
au sein de l'équipe COAST du laboratoire GRIC (UMR 5612)

Jury Daniel Beaufils, Jean-Louis Martinand, Rapporteur Martine Méheut, Rapportrice Gilbert
Pietryk Sylvianne Rémi Andrée Tiberghien, Directrice

Table des matières

Remerciements . .	1
Résumé .	5
Introduction . .	7
Partie A : Cadre théorique et questions de recherche .	13
Chapitre I Approche phénoménologique du son . .	13
I.1 Les multiples facettes du son .	14
I.2 Des sons à décrire .	27
Chapitre II Son et enseignement de la physique .	40
II.1 Brève histoire de l'acoustique et de son enseignement en physique .	40
II.2 Enseigner le son .	49
II 3 Le savoir à enseigner actuel .	67
Chapitre III Caractérisation des savoirs et structures de connaissances chez les apprenants : le cas du son. .	82
III.1 Repères théoriques .	83
III.2 Revue des travaux sur les conceptions des enfants .	95
III.3 Revue des travaux sur les conceptions au niveau secondaire et universitaire .	99
Chapitre IV Hypothèses et questions de recherche .	111
IV.1 Le "son" : un cas caricatural pour les problèmes d'enseignement et d'apprentissage de la physique ? .	111
IV.2 Articulation entre la recherche et l'enseignement et ses effets .	116
IV.3 De la phénoménologie et systèmes explicatifs quotidiens aux outils d'analyse des productions d'élève . .	119
IV.4 Présentation de l'information scientifique : élaboration et rôle des outils de simulation . .	120
Partie B : Proposition de séquences d'enseignement .	123
Chapitre V Hypothèses pour l'élaboration de la progression et analyse du savoir à enseigner .	124
V.1 Hypothèses d'apprentissage . .	124

V.2 Analyse du savoir à enseigner en terme de modèles et d'objets et événements .	135
Chapitre VI Un enseignement expérimental favorisant la modélisation : le travail du groupe "SOC". . .	140
VI.1 Présentation du groupe SOC . .	140
VI.2 Rôle des activités expérimentales et modélisation . .	143
VI.3 Contenus traités et documents proposés . .	149
VI.4 Un enseignement expérimental favorisant l'activité de modélisation : deux exemples importants .	156
Partie C : Systèmes explicatifs, langage et enseignement .	171
Chapitre VII Investigation sur les systèmes explicatifs : méthodologie . .	172
VII.1 Une nouvelle approche .	172
VII.2 Problématique . .	181
VII.3 Présentation du questionnaire et de la population .	184
VII.4 Outils d'analyse des questions .	195
VII.5 Élaboration et utilisation des grilles d'analyse . .	202
Chapitre VIII Présentation des questions et résultats . .	207
VIII.1 Présentation des questions et résultats spécifiques .	207
VIII.2 Résultats globaux et conséquences pour l'enseignement .	308
Chapitre IX Langage et savoirs au sujet du son .	320
IX.1 Cadre théorique et hypothèses .	321
IX.2 Premiers résultats issus de l'investigation sur les systèmes explicatifs . .	327
IX.3 Méthodologie .	333
IX.4 Résultats et analyse . .	337
IX.5 Conclusion pour l'enseignement .	364
Partie D : La simulation comme aide à la modélisation : <i>simulaSON</i> . .	367
Chapitre X Hypothèses d'élaboration et présentation de <i>simulaSON</i> . .	368
X.1 Cadre général du développement du logiciel .	368
X.2 Apport de la simulation animée dans le cas du son .	372
X.3 Simulation et modèles. Statut du monde de la simulation . .	380

X.4 Hypothèses sur les représentations sémiotiques .	391
X.5 Description de <i>simulaSON</i> .	395
X.6 Simulation et expériences . .	403
X.7 Analyse critique . .	406
Conclusion .	411
Nécessité et apport de l'analyse phénoménologique .	412
La méthodologie adoptée .	414
Les résultats des expérimentations . .	416
Systèmes explicatifs .	416
Approche linguistique .	417
Les outils d'ingénierie .	418
L'enseignement proposé par le groupe SOC . .	419
SimulaSON .	420
Éléments de discussion et perspectives . .	421
Au sujet de la méthodologie .	421
Au sujet de l'ingénierie . .	422
Bibliographie . .	425
Annexes . .	435
Annexes relatives à la partie A .	435
Physique - Chimie Allégements en seconde et première S applicable à la rentrée 1999 . .	442
annexes relatives à la partie B .	445
Consignes à donner à l'élève pour résoudre les différentes tâches .	445
Analyse de 5 des 7 TP proposés par le groupe SOC à l'aide de la grille d'analyse du projet européen "Labwork in Science Education" .	446
Annexes relatives à la partie C .	453
Question B . .	461
Question C . .	464
Question D . .	467
Question E . .	470

Question F . .	474
Question G . .	477
Question H . .	480
Question I (grille de codage commune à la question H) .	481
Question J .	488
Question K . .	496
Question L .	501
Question M .	504
Question N . .	506
Question O . .	509
Question P . .	512
Question Q . .	519
Question R . .	522
Question S . .	525
Question T . .	528
annexes relatives à la partie D .	531
Émettre, Question 4 (recherche iconique) : résultats .	541
Recevoir, Question 4 (recherche iconique) : résultats . .	542
Définitions des termes étudiés (et dérivés) (Nouveau Petit Robert, 1995) (extraits essentiels) .	544
Modèle microscopique de la propagation du son accompagnant l'utilisation de <i>simulaSON</i> . .	551
Tâches proposées dans la version d'expérimentation de <i>SimulaSON</i> .	554

Remerciements

La position d'ouverture traditionnellement attribuée aux remerciements dans la pagination d'une thèse n'est pas vraiment révélatrice de l'effet qu'ils me procurent : quand vient l'heure des remerciements, vient l'heure des bilans... Et c'est alors le film de trois années qu'il convient de se repasser, seul moyen de rendre hommage à *tous* les acteurs, quel que soit leur rôle dans ce synopsis au dénouement tant attendu. L'analogie cinématographique s'arrête là car contrairement à la cérémonie des Oscars, la finalité de ces remerciements n'est pas celle d'une remise de décoration ou de prix d'excellence, en maniant la brosse à reluire ou le discours convenu mais bien plutôt celle d'une reconnaissance sincère envers tous ceux qui ont participé à cette entreprise collective qu'est une thèse.

Il est évidemment tout naturel d'adresser d'abord ma plus grande reconnaissance à Andrée qui m'a proposé de m'embarquer et qui m'a accompagné dans cette aventure. Sa passion, son enthousiasme et son dévouement pour la cause juste d'un apprentissage efficace de l'enseignement des sciences n'ont cessé de m'étonner. J'en ai largement bénéficié : elle n'a pas ménagé ses efforts pour trouver une bourse de thèse d'abord, pour "relancer la machine" ensuite lorsque ceci s'est avéré nécessaire et, enfin, pour que la rédaction de la thèse soit achevée dans les délais. Sa disponibilité, son suivi de mes travaux furent exemplaires quand, autour de moi, tant d'exemples de "thésards" me montraient la chance qu'il y a à pouvoir compter sur un guide efficace... Je me rends compte aujourd'hui du confort induit par sa rigueur scientifique et son expérience. Enfin, et ceci compte tout autant que le reste, j'ai toujours apprécié, à côté des qualités scientifiques d'Andrée, ses qualités "humaines". Les nombreux échanges, sortant bien souvent du champ de la recherche, ont été pour moi essentiels, en m'apprenant beaucoup et en rendant le travail bien plus agréable. Pour toutes ses raisons, je la remercie chaleureusement.

Je voudrais exprimer également ma gratitude aux autres membres du GRIC et particulièrement ceux de l'équipe COAST, qui ont tous contribué à une ambiance studieuse mais détendue. Merci à Françoise qui, par sa gentillesse et son efficacité permet à tous de travailler dans de bonnes conditions, en les déchargeant en particulier de tâches parfois fastidieuses. Je remercie également les thésards qui m'entouraient : Arnaud pour ses remarques et questions constructives mais aussi pour son soutien et son aide dans la rédaction, Laurent pour les longues discussions enrichissantes qui ont permis de révéler des affinités et des points de vue souvent proches, Laurence pour m'avoir supporté comme voisin pendant tout ce temps. Je n'oublie pas tous ceux qui, même si je les côtoyais moins, ont pu me donner des conseils ou me faire des remarques fructueuses : Christian, Mathieu, Jean-François, Henri-Pierre, Bernadette, Mickael, Kris. Je remercie spécialement Erika deVries de m'avoir initié à SPSS et aux méthodes statistiques et Gérard Collet de l'aide qu'il m'a apporté quant à l'approche langagière de mes travaux. Merci également à Jean-Claude Régnier, de l'ISPEF, pour les conseils qu'il m'a donnés pour l'élaboration des questionnaires.

Un grand merci à Jean-Louis Martinand et Martine Méheut pour avoir bien voulu rapporter ce travail, mais également à Daniel Beauvils, Gilbert Pietryk et Sylviane Rémi pour avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse.

Ce travail n'aurait pas vu le jour sans celui des enseignants avec lesquels j'ai pu collaborer. Je remercie tout spécialement les enseignants du groupe SOC de m'avoir parfaitement intégré et considéré comme membre du groupe à part entière malgré mon inexpérience aussi bien de chercheur que d'enseignant. Je remercie en particulier les enseignants du sous-groupe SON,

Ginette Besson, Anne-Marie Colonna, Claudine Guettier et Jean-Marie Chastan pour la confiance qu'ils m'ont faite. Merci également à Pierre Gaidioz, Marie-Odile Martineu et Anne-Marie Miguet pour leur intérêt fréquent porté à mon travail et leurs encouragements. Toute ma gratitude va également à Mr Ganivet et Mme Monneret pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches et à mon avenir dans l'enseignement.

Ce travail n'aurait pas été possible sans tous les enseignants (qu'ils fassent partie du groupe SOC ou non, qu'ils enseignent la physique ou le français) qui ont accepté que leurs élèves passent mes questionnaires. Pour les quelques expériences menées là-bas, je tiens aussi à saluer tout particulièrement les équipes techniques des laboratoires du lycée Fays et du lycée de St Genis-Laval, et en particulier Sylvain Lichtenberger.

Concernant mes expérimentations, je n'oublie pas les quelques sept cents élèves qui ont passé au moins un de mes questionnaires et qui ont généralement joué le jeu avec sérieux.

Pour leur aide technique, je tiens à remercier Christophe Batier (de la cellule NTE de Lyon 1) qui, avec sa bonne humeur constante, m'a initié à la lecture optique de questionnaires, ainsi que Serge Miguet qui a proposé au débutant que j'étais un outil de simulation adapté à mes faibles capacités et qui m'a convaincu que j'étais capable de me transformer en programmeur amateur...

Même si ces remerciements prennent place dans ce qui constitue le résultat de trois années de recherche, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance aux personnes qui m'ont fait confiance pour les tâches d'enseignement que j'ai également dû remplir durant cette période. Je pense en particulier à Roger Duffait qui m'a permis d'intervenir à un niveau qui m'intéresse particulièrement (la préparation au CAPES) en m'initiant et en me laissant toute liberté. J'ai non seulement eu énormément de plaisir à travailler avec lui mais j'ai également beaucoup appris au cours de cette expérience. Je tiens également à remercier Hervé Gayvallet qui m'a fait confiance pour quelques corrections de leçons et qui m'a toujours encouragé dans la voie que j'avais choisie.

Cette thèse a parfois été vécue comme un chemin de croix. En de pareils cas, ce sont aussi les amis qui aident à poursuivre ou à faire diversion l'espace d'un instant. Je voudrais ici les saluer, sans les citer tous puisqu'ils se reconnaîtront. Deux d'entre eux ont cependant été plus directement concernés par mon travail : Jérôme parce qu'il a été un utilisateur constructif de mes productions, mais également Ludovic pour l'intérêt qu'il a porté au logiciel dont il avait imaginé quelques caractéristiques.

Il est également de coutume de clore le moment des hommages par ceux qui vont à la sphère privée, sans qu'elle ne puisse être séparée du réseau humain dans lequel se débat le "pauvre" thésard perdu dans ses pensées et angoisses...

A mes parents d'abord : cette envie d'apprendre et de se dépenser pour que d'autres aient accès au savoir, c'est sans nul doute à eux que je la dois. Parce que sans que ce soit forcément explicite, le Savoir était toujours vivant et varié dans le cocon familial et son importance pour, plus tard, savoir *être* devenait une évidence. Une telle subtilité dans cette façon de donner l'envie d'apprendre, sans jamais "mettre la pression" mais en rendant plutôt les choses naturelles, continue de m'épater. Merci à eux de m'avoir permis de faire tout ce chemin pour finalement me rendre si curieux et joyeux d'enseigner et me donner l'envie de comprendre comment mieux enseigner.

A ma soeur, Delphine, qui m'a accompagné et soutenu, en particulier dans une dernière année studieuse en vivant la sienne de son côté. L'intérêt commun que nous avons, entre autres choses, pour l'enseignement et l'éducation, a souvent contribué à me convaincre de l'utilité d'un tel travail.

A mon frère, Jean-Marc, le "guide" sans qui je n'aurais sans doute été ni "prof", ni "de physique". Merci à lui et à Emmanuelle pour leurs encouragements constants.

A mes beaux-parents qui ont su me faciliter la vie pendant une rédaction qui, de fait, n'était plus perturbée par de fastidieuses tâches quotidiennes.

A Cécile surtout, même si c'est à elle qu'il est le plus difficile d'adresser ma reconnaissance. Elle fut ma plus fidèle supportrice, en s'acharnant à me prouver son objectivité, dont je doutais régulièrement. Elle est de toutes ces pages et de ce long cheminement, impliquée à bien des titres. En bonne physicienne, elle a toujours cherché à libérer les contraintes pour me permettre de trouver mon équilibre. Je n'oublierai pas son dévouement à mettre tout son *coeur* à mon ouvrage. C'est donc l'heure des excuses pour ce temps volé, pour ces absences trop longues et pour ces tourments chroniques face auxquels elle a toujours su trouver les mots justes.

Enfin, émilie, ton papa n'a pas été autant disponible qu'un petit bout comme toi en a besoin. Nous avons toute la vie devant nous pour nous rattraper. Cette thèse est terminée, et pour nous, ça ne fait que commencer...

Résumé

Clairement ancré dans le champ de la didactique de la physique, ce travail s'intéresse à l'enseignement et l'apprentissage de la physique élémentaire relative aux phénomènes sonores. Il a permis de développer des aspects théoriques nouveaux et des méthodologies associées. L'analyse phénoménologique menée *a priori* au sujet des savoirs en jeu, à la fois quotidiens et scientifiques, a conduit à la mise au point d'outils d'investigation pour dégager les traits caractéristiques des systèmes explicatifs utilisés par les élèves lors de la description et de l'explication de situations quotidiennes. Une approche lexicale et sémantique a parallèlement contribué à ces investigations.

Les résultats obtenus, d'une grande cohérence mutuelle, révèlent en particulier la référence prégnante à la perception auditive pour décrire et interpréter, la difficulté à adopter des invariants de raisonnement dans des contextes variés, la contingence des explications aux situations et un recours prédominant aux objets et aux événements plutôt qu'aux concepts scientifiques.

Une progression d'enseignement, élaborée collectivement et basée sur l'activité de modélisation a été analysée. Les outils élaborés ont permis d'évaluer l'effet de cet enseignement et d'un enseignement "classique" sur les systèmes explicatifs des élèves et les connaissances qu'ils utilisent. Les évolutions, globalement assez peu nombreuses, sont largement amplifiées pour la population ayant suivi l'enseignement élaboré révélant dans ce cas un apprentissage de nature scientifique.

Enfin, ce travail propose une simulation informatique élaborée à partir des besoins mis alors en évidence et de la littérature didactique. Cette simulation, en permettant la manipulation de modèles concernant la création et la propagation du son, vise l'amélioration des apprentissages sur le sujet.

Mots-clés :

son – enseignement – apprentissage – phénoménologie – conceptions – langue - simulation

Introduction

Cette recherche a pris naissance dans le contexte du travail d'un groupe de recherche-action (dénommé SOC) réunissant enseignants et chercheurs en didactique des sciences physiques, et ayant pour objectif commun l'élaboration de séquences d'enseignement pour le lycée. Participant au sous-groupe qui traitait de la partie "sons et ultrasons" du programme de 2^{nde} des lycées, nous avons naturellement centré notre travail de recherche sur les processus d'enseignement et d'apprentissage des savoirs élémentaires de physique relatifs aux phénomènes sonores, et aux conditions favorables pour l'un et l'autre de ces processus.

Un sujet aussi vaste que celui "des sons"¹ pose évidemment des problèmes quant à la délimitation des sujets dont la physique va traiter. Les textes officiels sont un moyen opératoire et pratique d'effectuer cette délimitation, en partant du fait que les savoirs à considérer sont ceux reconnus comme tels par la discipline². Le fait que les sons soient omniprésents dans l'environnement quotidien, qu'ils impliquent des entités et des événements dont la physique ne traite pas forcément est quelque peu négligé : les sons vont d'abord être ce que la physique en dit, dans un mouvement implicite de détachement du champ empirique quotidien. C'est la perception de ce décalage, plus important encore que pour d'autres domaines de la physique, entre le champ de référence du physicien et le champ de référence quotidien au sujet "des sons", qui a initialement motivé cette

¹ Cette expression est l'usage courant que nous avons pu observer, en guise de désignation de cette partie du programme.

² Ces savoirs contribuent d'ailleurs, de façon tautologique, à délimiter les contours de la discipline.

recherche.

Si la didactique de la physique ne participe que peu à l'élaboration des contenus dont l'enseignement et l'apprentissage constitue son objet d'étude, elle a en revanche toute latitude pour choisir les inspirations théoriques et les méthodes scientifiques qu'elle estime pertinentes en référence aux objectifs fixés. Malgré sa relative jeunesse, la didactique ne s'est d'ailleurs pas privée, dans toute la variété des travaux originaux qu'elle a su produire, d'emprunter réflexions théoriques et méthodologies efficaces à d'autres disciplines, parfois à peine plus anciennes : psychologie développementale, psychologie cognitive, philosophie, épistémologie, psycho-sociologie, linguistique... Elle a su parallèlement exploiter ces emprunts pour développer ses propres méthodes et paradigmes.

Notre démarche est assez révélatrice de l'ambivalence qui vient d'être mentionnée : une référence indispensable à la discipline qui est à considérer telle quelle et une liberté toute aussi indispensable et fructueuse quant aux rencontres et échanges avec d'autres sciences humaines.

Le domaine "acoustique" est bien reconnu comme faisant partie de la discipline "sciences physiques" par la sphère savante. Il n'est nul besoin d'arguer du fait que c'est un sujet régulièrement mis au goût du jour dans l'enseignement secondaire français, en particulier pendant toute la durée de cette recherche, pour s'en convaincre. Mais autant les phénomènes électriques sont reconnus d'emblée par chacun comme relevant de la physique, autant les phénomènes sonores dans leur ensemble ne font pas l'unanimité sur ce point. Pour tout un chacun, les phénomènes sonores sont d'abord auditifs, impliquant de plus en plus d'objets techniques dont la complexité va croissante. Objectiver et conceptualiser des événements qui paraissent aussi naturels et évidents que n'importe quelle observation faite quotidiennement depuis la naissance n'est pas une chose qui s'annonce *a priori* facile. Les manifestations observables visuellement sont extrêmement rares, et le seul rapport perceptif évident que l'être humain entretient avec les sons, c'est... ce qu'il entend, les actions qu'il mène pour créer un son et les habitudes-réflexes qui en découlent naturellement. Le caractère familier des sons perçus et créés induit alors un décalage important avec ce que la physique dit à propos du même signifiant "son" (ou "phénomènes sonores"). Par exemple, comment ne pas être surpris par l'utilisation d'ondes acoustiques pour "voir" un fœtus dans le ventre de sa mère.

Quels que soient les problèmes spécifiques, la didactique se doit d'aborder ce domaine de la physique élémentaire, d'autant plus que les travaux à ce sujet restent rares. Cette particularité des phénomènes sonores invite en tous les cas la didactique à développer davantage encore la deuxième spécificité que nous lui avons attribuée : l'ouverture de son champ de réflexion à d'autres disciplines, ou au moins à des points de vue qui s'éloignent quelque peu des problématiques de la didactique. C'est ainsi que nous avons choisi de réfléchir à ce qui est reconnu comme phénomènes sonores dans le domaine quotidien et dans le champ scientifique de la physique. L'approche phénoménologique adoptée à cet effet, influencée par quelques réflexions philosophiques, nous a semblé adaptée pour caractériser précisément le décalage mentionné ci-dessus qui, non explicité, pourrait donner lieu à des quiproquos dommageables pour l'apprentissage. Cette analyse nous a également conduit à porter un

intérêt tout particulier à l'approche lexicale et sémantique qu'il est possible d'avoir des savoirs en jeu, même si les développements théoriques seront limités.

Ces "pas de côté" permettent alors d'éclairer et d'enrichir les autres éléments théoriques que nous utilisons, plus habituels en didactique : épistémologie, statut de l'expérience, transposition, rôle des représentations sémiotiques.

L'ensemble des outils théoriques utilisés permet l'analyse des sujets suivants :

- contenus d'enseignement anciens et actuels au sujet du son ;

- travaux sur les conceptions et sur ce que nous appellerons les systèmes explicatifs des apprenants ;

- travaux sur le rôle de l'activité de modélisation.

Les conditions sont alors réunies pour étudier les traits phénoménologiques majeurs de la pensée commune au sujet "des sons" et les écarts par rapport à la physique. En ouvrant le champ empirique considéré, nous cherchons en particulier à mieux connaître les systèmes explicatifs des élèves qu'il est possible de reconstruire partiellement à partir de leur productions écrites dans des situations où descriptions et interprétations leur sont demandées. Ceci conduit à élaborer des outils méthodologiques qui seront détaillées et dont la pertinence sera discutée. Cette étude se placera également dans une perspective dynamique en se donnant les moyens d'évaluer les évolutions constatées après enseignement.

Il nous a semblé également intéressant d'analyser en quoi l'usage lexical peut contraindre ou révéler les processus cognitifs en jeu dans l'apprentissage. Une investigation sera alors menée sur certains termes ayant à la fois des facettes notionnelles et conceptuelles. Nous étudierons l'usage qui paraît le plus adapté pour les élèves et chercherons les traits sémantiques qu'ils attribuent à ces termes.

Les considérations théoriques ont également préparé le terrain pour proposer et analyser des outils d'ingénierie. Cet aspect plus pragmatique de notre recherche comporte en fait deux volets dont l'envergure et les modalités de mise en pratique sont très différentes : la progression d'enseignement concernant toute la partie "sons et ultrasons" élaborée par le groupe SOC et un outil informatique de simulation.

Pour donner une vue d'ensemble cohérente, cette présentation des points essentiels de notre travail ne respecte pas scrupuleusement son ordre de présentation, que nous détaillons ci-après.

Organisation de l'étude présentée

Notre travail se compose de quatre parties de longueurs assez différentes.

- **La partie A**, qui comporte quatre chapitres, présente l'essentiel de nos réflexions

théoriques ainsi que nos hypothèses et questions de recherche. Le premier chapitre est consacré à des réflexions sur la nature des phénomènes sonores et sur les différentes facettes phénoménologiques qu'ils renferment. Nous étudions aussi le rôle joué par l'interaction avec nos autres sens sur les causalités construites et les outils de description des sons. Nous mettons en particulier en lumière dans ce chapitre les écarts entre une vision quotidienne et scientifique des sons en soulignant la difficulté d'une description "objective" des perceptions auditives. Ces premières réflexions sont exploitées, dans le chapitre II, pour analyser l'enseignement de la physique à ce sujet. Après un bref historique de l'acoustique et de son enseignement, nous mettons en évidence l'intérêt d'un enseignement élémentaire des phénomènes sonores et les contraintes diverses qui pèsent sur un tel enseignement. Nous nous livrons ensuite à une analyse du savoir à enseigner actuel et à ses modifications récentes. Le chapitre III est consacré aux points de vue théoriques sur les caractéristiques générales des savoirs quotidiens et des savoirs scientifiques, ainsi que sur la structure des connaissances de l'apprenant. Ceci permet dans un second temps d'établir une revue critique de la littérature sur les conceptions au sujet du son. Les hypothèses et questions de recherche pourront alors être explicitées dans le chapitre IV.

La partie B est consacrée à la présentation de la progression d'enseignement proposée par le groupe SOC et aux hypothèses qui sont sous-jacentes. Elle comporte deux chapitres. Le chapitre V apporte quelques compléments théoriques concernant les hypothèses prises en compte pour l'élaboration de cet enseignement, en particulier au sujet de la modélisation. Après une analyse du savoir à enseigner en terme de modèles et d'objets et événements, nous exposons en détail, dans le chapitre VI, les contenus et les méthode proposées et élaborées collectivement par la groupe SOC.

La partie C, avec ses trois chapitres, constitue le corps de notre recherche puisqu'elle présente la méthodologie mise en place et les résultats obtenus au sujet des systèmes explicatifs des élèves et de leur évolution, ainsi que les investigations menées au sujet de l'utilisation de la langue naturelle. Les investigations sur les systèmes explicatifs sont exposées dans les deux premiers chapitres : le chapitre VII présente la méthodologie mise en place, en particulier les outils d'analyse des productions tandis que les résultats sont présentés dans le chapitre VIII. Ces résultats seront aussi un moyen de valider en partie l'enseignement proposé dans la partie B, puisqu'une comparaison des évolutions de deux populations (l'une des deux ayant suivi cet enseignement) est effectuée. Le chapitre IX est consacré aux expérimentations sur les usages linguistiques. Il regroupe à la fois des aspects théoriques et méthodologiques et les résultats.

la partie D, réduite au seule chapitre X, présente le logiciel de simulation nommé *simulaSON*, ainsi que les hypothèses préalables à sa conception (issues de la littérature sur la simulation et les systèmes de représentation) et les conditions de son utilisation. Elle explique comment il a été possible de "faire vivre", en particulier grâce à l'animation interactive, les modèles essentiels proposés par l'enseignement de la partie B : le modèle de la vibration pour la création sonore et le modèle particulière de la

propagation du son. Nous tenterons d'illustrer en quoi il peut améliorer la construction du sens de certains concepts de la physique en favorisant la modélisation et l'interprétation des expériences réelles.

La conclusion sera l'occasion de dégager, en réponse aux questions de recherche, les apports essentiels de ce travail tant sur le plan de la méthodologie que sur celui des grandes tendances de résultats. L'articulation entre réflexion théorique, investigations de recherche et outils d'ingénierie sera alors évoquée. La portée de ces résultats et l'adaptabilité des méthodes utilisées seront discutées dans une perspective générale d'amélioration de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique.

Partie A : Cadre théorique et questions de recherche

Chapitre I Approche phénoménologique du son

Le présent travail concerne de façon générale les processus d'enseignement et d'apprentissage de la physique des phénomènes qu'on a l'habitude de désigner dans le langage courant de "sonores". Avant de détailler nos analyses au sujet de l'apprentissage des savoirs concernés par cette classe de phénomènes, nous tentons dans ce premier chapitre de définir les contours du domaine phénoménologique concerné par la notion générale de "son". Il est en effet essentiel, dans une logique d'apprentissage, d'avoir conscience de la façon dont les caractéristiques des perceptions sonores peuvent contraindre les idées que l'être humain peut avoir sur le son. Ainsi, si nous restons bien dans le cadre de la didactique de la physique, nous faisons dans ce premier chapitre un détour vers des disciplines annexes mais utiles à notre recherche. Des réflexions issues de la philosophie (en particulier phénoménologique) ou de la psychoacoustique seront présentées. Nous serons amenés à dégager les spécificités du son par rapport à d'autres canaux sensoriels quant au mode de recueil d'informations, à étudier les différentes facettes qu'il peut recouvrir et à décrire les liens qui existent entre ces différentes facettes. Nous étudierons en particulier les "objets" à décrire pour une bonne connaissance du son

et les modes de descriptions offerts, sans jamais perdre de vue que notre propos est construit avec le souci constant d'apporter des contributions significatives à l'étude des processus d'enseignement et d'apprentissage et aux conditions favorables dans lesquelles ils peuvent avoir lieu.

I.1 Les multiples facettes du son

I.1.1 L'omniprésence du son

De quoi parle-t-on effectivement quand on parle du son ? Le terme "son" a cette particularité d'être utilisé quotidiennement pour renvoyer à des référents de natures très variées.

L'oreille est constamment en éveil, même si la réaction au stimulus est diminuée lors des phases de sommeil. Nous ne pouvons pas choisir de nous couper du monde sonore à notre guise comme nous pouvons fermer les yeux instantanément pour ne plus voir. Le réflexe dit "stapédien" nous permet certes de nous prémunir contre des sons intenses dont nous sommes prévenus mais la perception n'est qu'atténuée et nous ne pourrions jamais retrouver les libertés que nous pouvons prendre avec la vue. Le son nous entoure, nous ne le choisissons pas, et il nous parvient éventuellement dans la multiplicité de ses sources dispersées dans l'espace (voir plus loin). Le son est un outil très utile pour le repérage dans l'espace et pour la façon dont chacun vit dans son environnement. Le son intervient donc dans des situations quotidiennes extrêmement variées. Le caractère quotidien de ces phénomènes n'empêche en rien la complexité, aussi bien dans la façon dont on le crée, que dans son comportement dans l'espace ou encore dans les mécanismes de perception. Rien d'étonnant, dans ces conditions, que ce soit un objet d'étude pour bien plus d'une discipline scientifique.

I.1.2 Une variété de disciplines d'étude

L'acousticien Leipp (1989) définit l'acoustique dans son sens le plus large comme ***la "Science générale des sons perçus et intégrés par l'homme"*** (c'est lui qui souligne). On peut discuter cette définition et un physicien acousticien pourrait par exemple remettre en cause dans cette définition l'aspect perceptif, tellement la physique s'éloigne parfois, comme on le verra, de la perception auditive. En quoi par exemple les usages bénéfiques des ultrasons pour des applications variées (échographie, acoustique architecturale par exemple) utilisant des technologies issues de l'acoustique peuvent concerner la perception humaine, puisque par nature les ultrasons sont inaudibles ? Ces sons non-audibles (sons du point de vue de la physique) sont un indice parmi d'autres de la difficulté à définir une discipline unique qui traiterait du concept général de "son". Le Petit Robert fournit d'ailleurs une définition qui laisse une part un peu moins importante à l'aspect perceptif, malgré l'étymologie grecque

"akoustikos, qui concerne l'ouïe" : "Partie de la physique (en relation avec la physiologie, la psychologie et la musique), qui traite des sons (sons audibles pour l'oreille humaine, infrasons, ultrasons) et des ondes sonores (nature, production,

propagation, détection et réception)". La figure I.1-1 donne une idée de la diversité des disciplines scientifiques plus ou moins concernées par le son, à partir d'un "cœur" fondamental occupé par la physique.

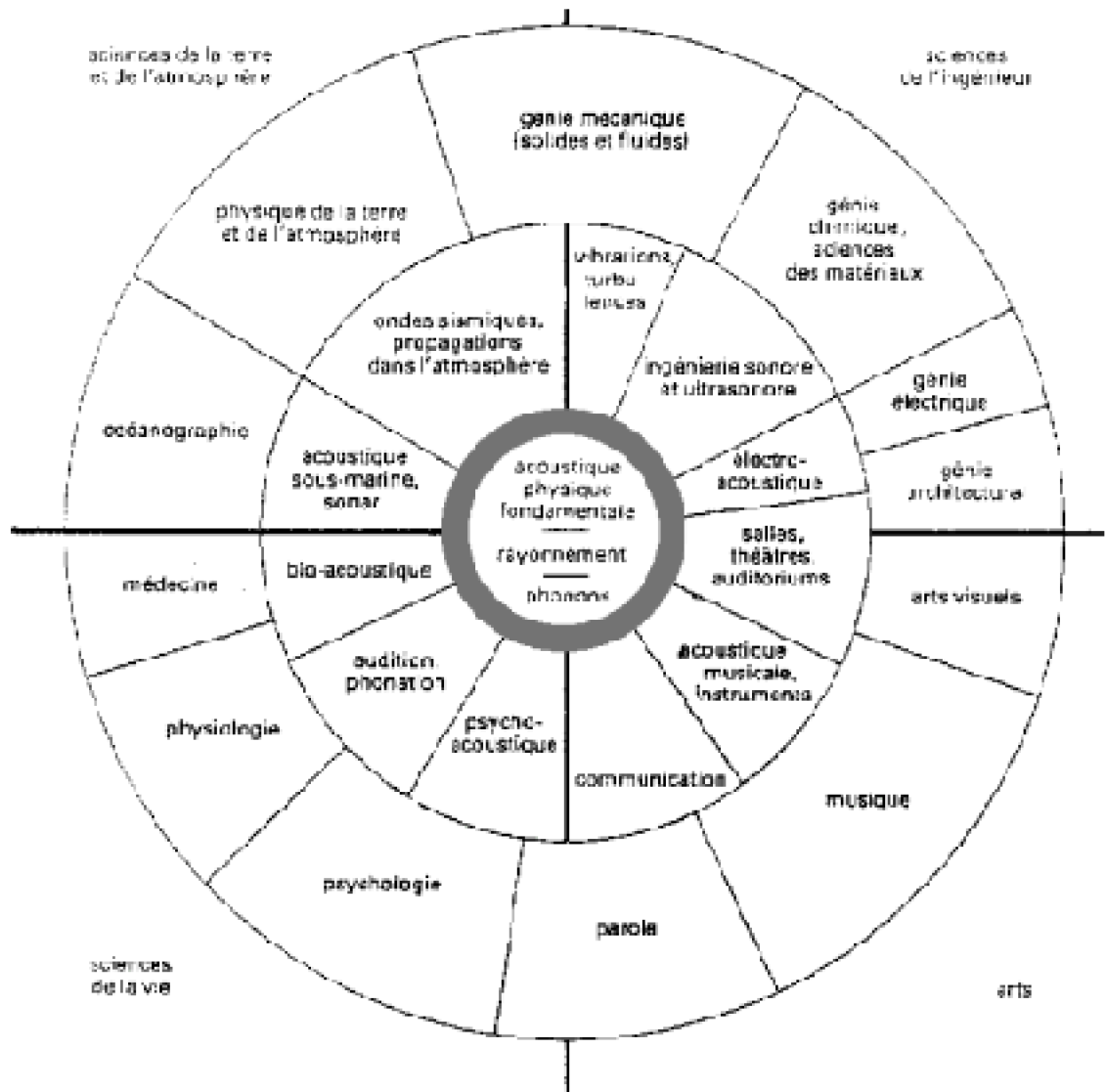


figure I.1-1 : Les ramifications de l'acoustique (d'après Bruneau M., Encyclopédie Universalis, "Acoustique")

Nous ne chercherons pas davantage ici à définir le champ de l'acoustique. Ce qui nous intéresse est cette difficulté de définition, qui dénote de fait une diversité de points de vue et d'objets d'étude, plus ou moins dérivés de notre perception auditive. Leipp (1989) poursuit ainsi en affirmant que **"l'acoustique moderne, science des sons, est actuellement divisée en un certain nombre de branches bien définies que l'on retrouve dans les comptes rendus des congrès internationaux d'acoustique : acoustique physique, acoustique psycho-physiologique, bruit, parole, acoustique des salles, acoustique moléculaire, etc."**. D'autres disciplines concernées par le son ne doivent pas être oubliées : philosophie, musicologie. Chion (1998) dit s'inspirer de Schaeffer pour fonder une discipline dénommée *acoulogie*, ayant pour objet d'étude ce

qu'on entend sous tous ses aspects (Schaeffer, cité par Chion, restreignait la discipline à l'étude des sons sous l'angle exclusif de l'écoute "réduite", écoute du son pour lui-même, en essayant de s'affranchir des causes et sensations évoquées par le son). Du fait de cette diversité, il est courant de nos jours de distinguer l'acoustique définie comme le fait Leipp (1989), qui fédérerait les différentes disciplines, de l'acoustique physique dont l'objet principal d'étude est l'onde sonore (voir plus loin). L'acoustique physique peut ainsi apparaître comme un sous-domaine de l'étude des vibrations mécaniques. Ce qui fait dire à Chion (1998) que l'acoustique **"est un domaine aussi mal défini que si l'optique s'occupait à la fois de la propagation des rayons lumineux et de leur nature physique, que de la reconnaissance des formes par l'oeil"** (P. 42). Schaeffer, cité par Chion, précise quant à lui qu'il n'est pas question en optique **"de confondre des zones aussi distinctes que l'étude de la lumière, l'étude des sources lumineuses, l'étude des corps éclairés, l'étude de la vision, l'étude de la perspective, etc."**, distinctions qui ne seraient pas faites en acoustique. On objectera qu'il conviendrait sur ce sujet de ne pas se laisser abuser par la proximité sémantique des termes. L'optique est probablement à rapprocher de l'acoustique *physique*, bien plus que de l'acoustique (dont l'analogie "visuel" serait plutôt l'électromagnétisme au sens large).

Toutes ces disciplines ayant un lien avec les sons sont en relation mutuelle, même si elles s'ignorent parfois. Leur champ d'investigation n'est pas toujours bien délimité et il existe de nombreux ponts entre elles. Nous allons voir que chacune de ces discipline porte un regard bien spécifique sur ce qu'est le son.

I.1.3 Une variété de point de vue sur le "son"

Cette difficulté de délimitation d'un domaine d'étude du son est révélatrice de la variété de ses facettes. Nous en tentons dans ce paragraphe une description non exhaustive, en commençant par des points de vue communs (ou de bon sens) et en finissant par des points de vue plus techniques ou scientifiques, concernant davantage l'expert de telle ou telle discipline.

I.1.3.1 Le son, c'est ce qu'on entend

Ce point de vue de bon sens est vite mis à mal par la physique qui affirme étudier des sons même inaudibles. Pourtant, c'est l'affirmation qui peut être probablement partagée par le plus grand nombre concernant le son. Notons que les perceptions auditives peuvent aller du désagrément à la sensation plaisante en passant par notre moyen de communication orale quotidien, le langage. Cette perception est évidemment dépendante du vécu et des souvenirs de chaque individu et on touche là probablement l'aspect le plus subjectif du son, dans la mesure où il est bien souvent difficile d'avoir devant le son ce que Chion (1998) appelle une attitude d'observation désaffectivée. On voit poindre ici la diversité des perceptions auditives sur laquelle nous reviendrons. Ceci met aussi en évidence la multitude de sources sonores que l'on peut envisager.

I.1.3.2 Le son est un événement qui a lieu à la source

Notre familiarité avec certains sons nous permet de mettre en relation des stimuli plus ou

moins connus avec des objets sources ou avec des événements que nous sommes capables d'imaginer. Ainsi en va-t-il de certaines reconnaissances de "schèmes sonores" (Chion, 1998) tels le frottement, le cliquetis, le bourdonnement... La perception d'un caractère sonore spécifique permet d'associer dans certaines conditions une propriété matérielle à l'objet source pensé. Chion utilise pour décrire ceci ce qu'il appelle les *indices sonores matérialisants* utilisés pour désigner **"un aspect d'un son, quel qu'il soit, qui fait ressentir plus ou moins précisément la nature matérielle de sa source et l'histoire concrète de son émission : sa nature solide, aérienne ou liquide ; sa consistance ; les accidents survenant dans son déroulement, etc."** (p. 102). Notre habitude à percevoir tel ou tel son va bien sûr influencer énormément notre capacité à reconnaître et exploiter ces indices sonores matérialisants. Casati et Dokic (1994) affirment pour leur part que les sons constituent **"des sources d'information sur la structure interne d'un objet"** (p. 34). Quoi qu'il en soit, il semble difficile de pouvoir atteindre ce que Schaeffer a appelé l'écoute *réduite*, l'écoute du son *pour lui-même*.

Nous pouvons à ce stade distinguer deux sous-catégories dans ce point de vue. Le son peut en effet renvoyer directement à un *objet* source ou bien à un *événement* source.

Nous avons déjà mentionné la relative facilitée que l'être humain possède pour relier des sons perçus à des objets qui les auraient émis. A tel point qu'on dira plus facilement "j'entends la voiture" que "j'entends le son de la voiture". Ces métonymies classiques dans le domaine sonore sont révélatrices de l'association forte entre un son et l'émetteur qui en est la cause. Ceci est particulièrement vrai dans le domaine musical où malgré la superposition instrumentale parfois importante, un auditeur attentif et entraîné est capable d'identifier les instruments présents. Cette habitude (ce besoin ?) d'associer des objets aux sons a également pour conséquence de rendre le son davantage comme un caractère que comme un objet. Le sémioticien Christian Metz, cité par Chion (1998), donne l'exemple selon lequel si il parle d'un vrombissement, son interlocuteur ne sait pas très bien de quoi il parle : **"j'ai pourtant été précis dans la classification du bruit, mais je suis resté vague dans celle de la source. Il suffit que j'inverse mes axes de précision, que je dise "C'est un bruit d'avion à réaction", pour que chacun estime que je me suis exprimé clairement et se sente satisfait. [...] Idéologiquement, la source sonore est un objet, le son lui-même un caractère. [...] Ainsi les bruits sont-ils classés beaucoup plus d'après les objets qui les émettent que d'après leurs critères propres"** (p. 50-51). Le même auteur poursuit en précisant que le vrombissement est bien un objet acoustique, tout comme n'importe quel objet visible est un objet optique. Il est cependant utile dans le cas présent d'ajouter l'adjectif "acoustique" au substantif "objet" alors que ce n'est pas nécessaire dans le cas visuel. Ce nécessaire ajout révèle une distinction plus fondamentale : si tous les objets qu'on peut voir sont des objets réels (qu'ils soient représentés sur une image en deux dimensions ne change rien à la représentation d'objet que l'on s'en fait), tous les "objets" qu'on peut entendre ne sont pas des objets réels. On entend soit un objet (on se représente l'objet) soit un (des) événement(s). Ce qui englobe ces deux entités est la notion d'"objet acoustique". L'événement audible est qualifié par le même auteur d'infra-objet, comme objet seulement sonore.

Les philosophes de la phénoménologie Casati et Dokic (1994) plaident eux

clairement pour aborder le son comme un événement et précisent le lieu de cet événement. Ils exposent ainsi leur théorie événementielle qui consiste à dépasser l'affirmation que **"la présence d'un son témoigne de la présence d'un événement"** (p.38) en postulant que les sons *sont* des événements dans l'objet résonnant et que ces événements déclenchent notre perception dans certaines conditions. Si ce point de vue partage avec l'acoustique physique l'aspect événementiel des sons (en physique l'onde est bien une catégorie particulière d'événement), des fractures apparaissent si la théorie événementielle est précisée. Pour ses auteurs, les perturbations et les sons restent en effet confinés à l'objet lui-même, tandis que les ondes sonores seraient un milieu informationnel pour les sons, comme la lumière sert à transmettre l'information "couleur" (figure I1-2). Ce point de vue (ainsi que l'analogie utilisée) sera critiqué un peu plus loin.

L'événement à la source (de nature vibratoire) est considéré comme essentiel, aussi bien par la théorie événementielle que par la physique, pour étudier le son mais, contrairement à la théorie événementielle, la physique considère davantage le son comme la propagation des vibrations dans un milieu donné (décrite par le concept d'onde sonore) (figure I1-2b).

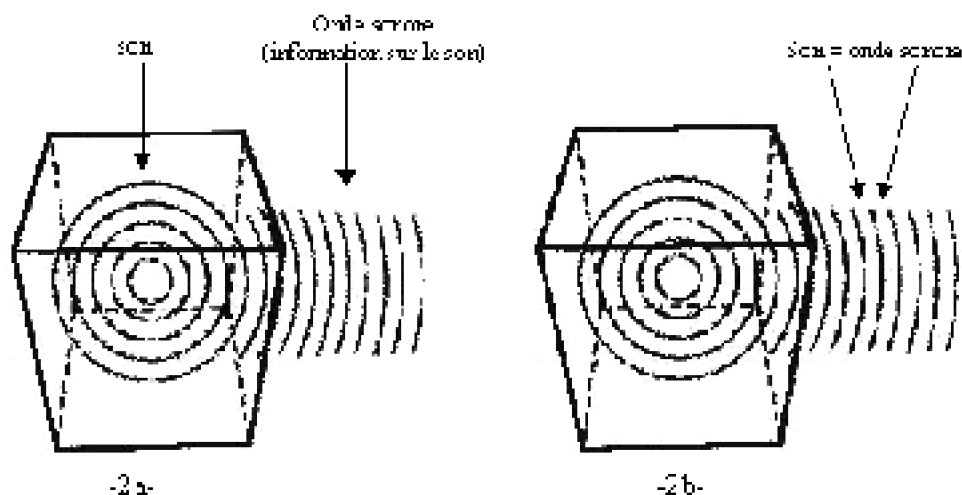


Figure I.1-2 : points de vue issus : - de la théorie événementielle (son comme un événement localisé autour de la source) (2a) - de la physique (2b) (d'après Casati & Dokic, 1994)

Nous ne chercherons pas à détailler davantage la théorie événementielle dans le cadre du présent travail mais cette théorie originale issue d'une réflexion philosophique permet de poser des questions intéressantes à la sphère didactique sur le sujet, en particulier quant aux deux facettes *cause* et *effet* du son. Sans adhérer pleinement à ce point de vue, nous aurons donc l'occasion de mentionner par la suite quelques-unes des problématiques qu'il soulève.

I.1.3.3 Le son est une entité qui évolue dans le temps

Une autre différence avec les images visuelles concerne la stationnarité temporelle, bien plus courante pour les phénomènes visibles que pour les phénomènes sonores. Il est effet remarquable de constater que les perceptions sonores sont dans la quasi-totalité des

cas (tout au moins dans les cas quotidiens) en perpétuelle évolution. Issus d'un événement, ils naissent et meurent, parfois rapidement. Ils sont bien évidemment les témoins des changements éventuels prenant place dans l'événement source. Comme le mentionne Chion (1998), si **"l'univers visible est majoritairement constitué d'éléments durables (à l'échelle du temps humain en tout cas), [...] l'univers sonore ne comporte qu'une petite minorité de sons dont les caractères de masse et d'intensité sont durables et stables à la fois, c'est-à-dire susceptibles de faire l'objet d'une observation"** (p. 46). Le contrôle et l'étude du son doit alors être le plus souvent visuel *via* la partition, le spectre ou la table de montage virtuelle d'un ordinateur.

I.1.3.4 Le son est une entité qui évolue dans l'espace

À côté de cette évolution temporelle, on peut mentionner une évolution (et donc une existence) spatiale des sons perçus. Un récepteur sonore ne capte pas le même signal selon la position qu'il occupe par rapport à la source. La variation de la perception humaine par exemple, peut conduire à des connaissances intuitives, qui elles-mêmes ont des conséquences kinesthésiques : on se rapproche intuitivement de la source sonore pour "mieux" entendre, ou on s'en éloigne pour être moins gêné. La théorie événementielle de Casati et Dokic (1994), étant à la recherche d'un "objet-source" du son, réfute cette vision des choses en objectant en particulier que le fait d'affirmer que les sons remplissent la pièce ne peut pas être pris littéralement et **"n'exprime rien d'autre que le fait que le son est audible à chaque endroit de la pièce"** (p.52). Ceci pose le problème plus général de la localisation et de la provenance des sons, mis en opposition par Casati et Dokic. Nous plaçons au contraire pour une dialectique constante entre ces deux points de vue. Nous pensons en effet qu'il serait abusif d'affirmer soit que le son ne se situe que là d'où il provient (provenance parfois impossible à délimiter, Chion citant l'exemple du ruisseau), soit que le son ne se situe que dans l'espace dans lequel il se propage. Chion (1998) nous rappelle cependant qu'il y a des sons qui, effectivement, **"nous donnent plus le sentiment que leur lieu se ramène à là "où ils résonnent""** (exemples des cloches dans une tour ou d'un coup de feu dans une forêt) plutôt qu'à **"là d'où ils viennent"** (exemples du sifflement ou de l'aboïement").

On peut dire que le nombre de variables impliquées est probablement trop grand pour permettre l'élaboration d'une théorie cohérente de l'espace sonore (le fait que le caractère ponctuel de la cause ne soit pas toujours acquis, le fait que le son puisse être réverbéré ou non selon son intensité, selon la surface rencontrée donnent une idée de la diversité et de la complexité des situations rencontrées). Dans ce cas comme dans d'autres, la physique étudie alors des situations dont on contrôle le nombre de variables et les paramètres. Mais ceci n'enlève rien au fait que l'évolution des sons dans l'espace (en tant qu'*onde sonore* cette fois, bien plus qu'en tant que *perception auditive*) est bien l'objet de l'acoustique.

I.1.3.5 Le son est une entité qui se déplace ou se propage

La capacité à occuper l'espace est inévitablement liée à la capacité de se déplacer. Dans l'histoire de la physique, le son a été très tôt vu comme une entité se déplaçant (5^e siècle

avant J.C. environ) (Encyclopédie Universalis). L'observation assez facile d'un décalage entre une cause visible et la perception sonore qui en résulte permet en effet de conclure à cet état de fait, sans pour autant savoir plus en détail ce qui se déplace réellement. Le terme de "propagation" utilisé plus précisément par la physique à ce sujet indique que ce qui se déplace n'est pas de nature matérielle mais de nature ondulatoire. Il n'est en effet pas facile de conceptualiser ce qui se déplace. Comment le son-"sensation perceptive" pourrait-il se déplacer s'il n'y a perception que là où il y a récepteur ? Est-ce la matière, support de l'information, qui se déplace ? Est-ce que le son se propage ou occupe instantanément tout l'espace disponible ? Si la propagation de l'onde sonore est un fondement de l'acoustique, le déplacement du son n'est pas compatible avec toutes les définitions du son. En particulier, la théorie événementielle de Casati et Dokic (les sons comme des événements dans l'objet résonant) induit la négation du déplacement du son. Partant de l'argument selon lequel **"les processus et les événements ne se déplacent pas" (car "pour qu'une entité se déplace de A à B, elle doit occuper intégralement d'abord A, puis B")**, ils concluent que **"l'onde sonore ne se déplace pas, mais différents segments spatio-temporels de l'onde sont localisés à des endroits différents en des temps différents"** (p. 41). Pour eux, il n'est nul besoin pour créer un son d'un milieu particulier, mais le milieu permet juste de le révéler : selon cette thèse un diapason continue à résonner indépendamment de la présence ou de l'absence de l'air et de temps en temps le son du diapason est inaudible parce que les conditions sont défavorables. Le point de vue suivant se met clairement en défaut par rapport à celui-ci.

I.1.3.6 Le son est un phénomène ondulatoire complexe

Ce point de vue est celui partagé par l'acoustique physique. On peut résumer la différence entre la théorie Événementielle de Casati et Dokic (1994) et ce point de vue (que ces auteurs placent dans la théorie classique) grâce à la Figure I.1-2 vue précédemment.

Il est cependant intéressant de noter que les deux théories mentionnées acceptent l'existence de l'onde sonore et étudient des événements (c'est la nature des sons et ce que représente l'onde sonore qui diffèrent d'une théorie à l'autre). C'est en ce sens que les deux théories peuvent être qualifiées de "physicalistes". Dans ce cadre, il peut être tout à fait naturel de considérer les ultrasons comme des sons particuliers, puisque l'aspect perceptif est quelque peu mis de côté. On voit l'écart et le chemin parcouru par rapport au premier point de vue que nous avons cité ("le son c'est ce qu'on entend").

I.1.3.7 Synthèse

Ainsi, le "son" est multiple et tout ce passe comme si son aspect quotidien et familier rendait difficile une définition simple et un domaine d'étude bien délimité.

On verra comment l'enseignement de sciences physiques, loin de lever ces ambiguïtés, ou au moins de les expliciter, évoque l'un ou l'autre de ces aspects selon la situation ou le concept à introduire.

Le son peut désigner alternativement une sensation sonore avec son cortège éventuel de suggestions implicites, d'évocations, ou bien les événements au niveau de la source causes de cette sensation, ou bien encore l'entité étudiée par le physicien, celle

qui se propage dans un milieu d'une certaine façon, avec certaines propriétés.

Ces différents points de vue peuvent être lus à travers une analyse causale. Nous revenons plus en détail ci-après sur les deux aspects majeurs du concept de son : ceux que l'on peut repérer comme étant plutôt cause et ou plutôt effet.

I.1.4 Le son : cause ou effet ?

La difficulté et la subtilité d'analyse des impressions sonores d'une part, de la nature du phénomène sonore d'autre part sont trop vastes pour être abordées ici. Il est cependant pertinent pour ce qui nous concerne de noter la dialectique cause / effet que recouvre le concept de son et qui a émergé des développements précédents. En effet, puisque nous nous plaçons dans un contexte d'apprentissage des mécanismes physiques impliqués dans les phénomènes sonores, nous sommes appelés à étudier ce que certains appellent l'aspect "objectif" du son, cause qui précède l'effet sensoriel. Cet aspect "objectif" des sons est reconnu par la physique comme un objet d'étude et peut donner lieu, parfois au prix d'efforts importants, à des analyses et des mesures. Ce que nous appellerons dorénavant "facette physique" de l'objet d'étude "son" comprend les phénomènes physiques existant au niveau de l'objet source de son mais aussi ce qu'il se passe dans le milieu de propagation (figure I.1-3). L'Encyclopédie Universalis reprend à son compte cette dialectique du son : **"le mot "son" désigne à la fois une sensation auditive et le phénomène physique susceptible de lui donner naissance"** (p. 1178).

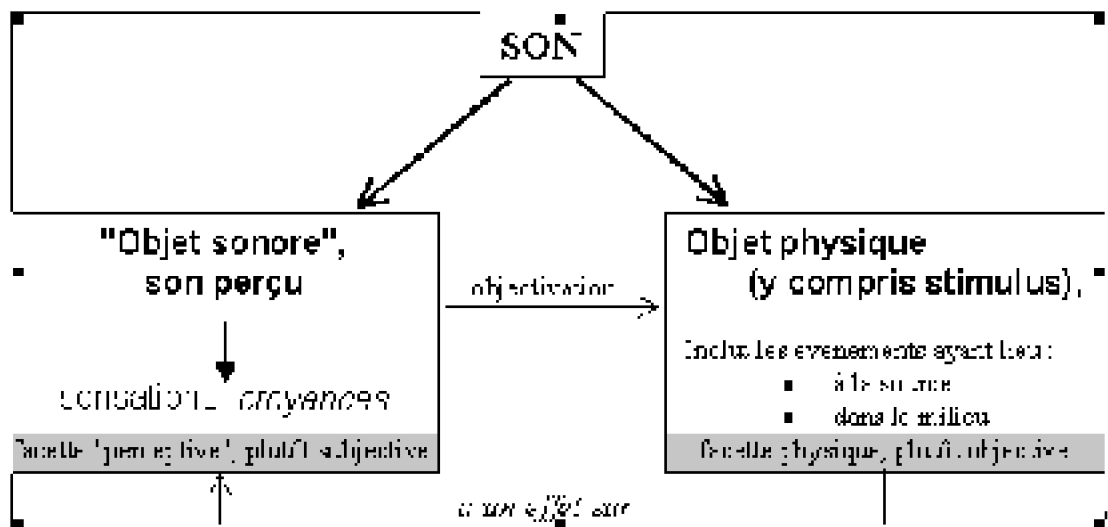


Figure I.1-3 : les deux facettes principales du concept "son"

Nous distinguons donc de façon schématique la cause de l'effet qui peuvent être toutes deux décrites par le même terme "son". Pour tenter de lever cette ambiguïté sémantique, Chion tente d'ailleurs de désigner l'effet, à savoir ce qui est entendu, perçu, par le terme "historiquement neuf" d'*auditus*, laissant le mot "son" **"aux techniciens et aux acousticiens, mais aussi à l'usage courant qu'on ne va pas prétendre réformer"** (p. 272). Schaeffer parle pour sa part d' "objet sonore" pour désigner ce qui ne relève que de la perception. Certaines théories du son élaborées en philosophie, citées par Casati et Dokic (1994), ont mis en évidence cette distinction même si la causalité n'est pas

forcément explicite. Ainsi, il peut être fait une distinction entre les événements sonores et les événements auditifs, objets supposés des expériences sonores. Helmholtz (1863), quant à lui, évoque dans sa *Théorie physiologique de la musique* les sons en tant qu'*ondes sonores* qui relèvent de l'acoustique physique, et les sons en tant que *sensations sonores*, objets de l'acoustique psychologique.

Par contre, tout en reconnaissant que **"la notion de flux d'information s'apparente aux concepts de causalité et de milieu"** et que la **"transmission de l'information est un processus causal"**, **Casati et Dokic (1994) pensent que "ce processus peut être considéré en deux sens : soit comme étant le milieu lui-même qui environne l'objet, soit comme s'effectuant dans ce milieu"** (p.61). Pour ne pas entrer dans les problèmes de définition philosophique de la notion de milieu (pris ici dans un sens différent de celui que lui attribue la physique), nous considérerons pour notre part les causes des perceptions auditives résident soit dans l'objet source (et son comportement événementielle), soit dans le milieu (milieu et événements y prenant place).

Il serait alors illusoire de croire qu'on va pouvoir, dans un contexte d'apprentissage, discourir sur les relations entre cause et effet en s'affranchissant de toute expérience sensible. Celle-ci constitue l'aspect "subjectif" du son, à savoir l'effet provoqué chez l'être humain par une cause ou un ensemble de causes. Nous utilisons ici le terme "subjectif" au sens où il est difficile de faire coïncider de façon simple et univoque les événements physiques et les sensations. Les relations entre ces deux aspects du son sont maintenant relativement bien connues (en particulier grâce à la psychoacoustique dont c'est l'objet principal) et les caractéristiques principales de ces relations sont relativement stabilisées, quelle que soit la population concernée.

Une fois cette précision faite, nous pouvons parler du processus d' "objectivation" des sons comme celui qui permet la compréhension des liens, même simplifiés, entre événements physiques et sensations auditives. Ce travail d' "objectivation" des sons est le point de départ de tout apprentissage de la physique relative au son et occupe donc une place centrale dans la suite du présent travail.

L'étude des sons peut difficilement se passer de l'un de ces deux aspects : c'est évident en ce qui concerne l'apport des perceptions sur la compréhension des phénomènes physiques qui les régissent mais, réciproquement, notre interprétation des sons, des paramètres physiques les caractérisant et de leur propagation peut modifier les perceptions correspondantes et permet d'envisager la détermination d'outils de classification et de description des sons perçus (cf. § 1.2). Notre habitude à relier les sons et les objets sources, notre expérience perceptive et nos déplacements font que nous imbriquons intuitivement les caractéristiques de la cause et ses effets sensoriels. Articuler ces deux facettes (et en avoir conscience) n'a donc rien d'évident et nécessite un réel travail.

I.1.5 Audition et vision

Il est assez remarquable que de constater que certains philosophes du son ou psychoacousticiens ont éprouvé le besoin d'ajouter l'adjectif "sonore" au substantif objet pour désigner ce que l'on perçoit auditivement. On procède ainsi par métaphore à partir

d'une référence visuelle, de même que dans l'expression "image auditive" (McAdams, 1985). Ces tournures métaphoriques sont plus que des figures de style, elles pourraient révéler une certaine habitude préférentielle (ou habilité) à parler du visuel davantage que de l'auditif dans notre perception du monde. Lakoff et Johnson (1980) explique ainsi que **"les hommes ont besoin pour appréhender le monde d'imposer aux phénomènes physiques des limites artificielles qui les rendent aussi discrets que nous, c'est-à-dire en font des entités limitées par une surface"** (p. 35) et qu'ils font ainsi appel pour cela à des *"métaphores ontologiques"*, qui font concevoir en particulier les événement et les actions comme des objets.

Nous tentons ici d'aller un peu plus loin dans le repérage de quelques différences entre d'une part l'ouïe et la vue, d'autre part les deux types d'information correspondant. Ceci aura une importance non négligeable pour les processus d'apprentissage des phénomènes sonores qui font inévitablement intervenir des représentations visuelles.

Sources dispersées du ou des sons perçu(s). Nous avons déjà mentionné au tout début de cette partie (§ I.1.1) que l'oreille est de façon générale plus sollicitée que l'oeil dans la mesure où l'être humain ne peut pas choisir de fermer ses oreilles comme il ferme ses yeux, ou de n'écouter qu'un "point sonore" comme il peut fixer son regard sur un détail bien précis. L'oreille serait ainsi plus passive que l'oeil, en subissant les stimuli qu'elle reçoit. Il y a superposition spatiale des sons (les capacités à séparer les sons et à se concentrer sur une source donnée sont le résultat d'un travail et d'une habilité à développer). On ne rencontre pas l'analogie pour les images visuelles. Il n'est pas question ici, malgré ce qui vient d'être dit, de nier le fait avéré de la capacité qu'ont les êtres humains à séparer psychologiquement les sons provenant de différentes sources si tant est que le bruit de fond n'est pas trop important (effet de masque). Tout un chacun est capable d'effectuer un tri dans le magma perceptif et de suivre par exemple une conversation dans un brouhaha, pour autant que celui-ci ne soit pas trop fort pour rendre l'effet de masque trop important. On peut également "ne plus entendre" (ne pas en avoir conscience plus exactement) un bruit apparaissant régulièrement dans son lieu de vie habituel alors qu'il ferait réagir n'importe quel visiteur. Le tri s'effectue dans un stimulus qui a des causes multiples mais il est bien plus difficile que dans le cas de la vision.

Sources invisibles du ou des sons perçu(s). En plus du fait qui vient d'être cité selon lequel l'être humain est capable de séparer des signaux auditifs issus simultanément de différentes sources ou événements, il est utile de souligner, à la suite de Nogué cité par Casati et Dokic que **"l'oreille est [...] un organe de découverte remarquable, plus varié encore dans ses applications que l'oeil, puisqu'il peut fonctionner en toute circonstance et même à travers les masques divers qui arrêtent le regard"** (1994, p. 31-32). On peut en effet entendre des sons issus d'objets hors de vue, **"soit parce qu'ils sont cachés par des obstacles, soit parce qu'ils se situent derrière l'auditeur, soit parce qu'ils concernent l'intérieur d'objets qui ne sont pas transparents au regard"** (p. 32). Ces caractéristiques de l'ouïe ne sont pas partagées

par la vue. Le rapport aux objets dits "sonores" s'en trouve modifié, par rapport aux objets visibles. Tout comme la vue ou l'odorat, l'ouïe est fortement liée à la distance et à l'espace en nous permettant d'obtenir des informations sur des objets éloignés. L'information que l'on récupère sur l'organisation spatiale grâce à ce qu'on entend et les modes de recueil de cette information sont cependant bien différents selon que la perception a lieu visuellement ou auditivement.

Information sur l'espace. Si l'écoute stéréophonique humaine réalisée dans des conditions favorables permet de localiser les sources sonores sans les voir, on sait cependant aujourd'hui grâce à la psychoacoustique que cette localisation dépend des caractéristiques du son (Chaigne, 1992). Il en va de même pour l'estimation de la distance de la source, qui ne dépend pas que de l'intensité globale (mais aussi de la réverbération et de la composition spectrale). Sans négliger les effets d'optiques dorénavant bien connus, on peut donc raisonnablement estimer que la détermination de la position de l'objet est sensiblement plus précise lorsque celui-ci est visible que lorsqu'il est audible. La corrélation entre les deux perceptions, lorsqu'elle est possible, assure la détermination la plus précise qui soit. Une différence importante avec la perception visuelle au sujet de la détermination des distances ou des localisations réside dans le fait que dans le cas d'un signal sonore, l'être humain n'a pas d'autre choix que de procéder par comparaison. C'est par une analyse différentielle (par exemple le son devient de plus en plus fort quand on bouge dans telle direction) que l'on peut déterminer la position de la source sonore. Casati et Dokic (1994) signalent ce point en soulignant que la situation est analogue avec l'odorat. On peut par contre mentionner une analogie assez forte entre vision et audition en ce qui concerne le rôle qu'on attribue au milieu. Casati et Dokic usent du lexique visuel pour parler de la *transparence* du milieu dans le cas du son. Ils la définissent en affirmant que **"les milieux sont des véhicules pour la causalité mais (ou peut-être parce que) les interactions causales qu'ils sous-tendent ne les affectent que marginalement"** (p. 62). Il convient alors de distinguer une transparence totale ou une transparence relative selon les situations. Mais il semble pertinent de s'accorder avec ces deux auteurs sur le **"principe psychologique général : les milieux perdent leur transparence lorsque l'objet ne peut pas se charger de la variation (perceptive) que nous devrions lui imputer si nous ne voulions pas renoncer à la transparence du milieu. Nous ne tolérons pas qu'une partie du paysage devienne, sans aucune raison rouge [...] ; dans ces conditions, nous "préférons" voir une altération des conditions environnantes : nous voyons la vitre rouge"** (p. 63). Ceci suppose une capacité de l'être humain à prévoir ce qu'il devrait entendre dans des conditions de transparence. Même si ce n'est pas toujours le cas, le milieu cesse en effet d'être **"cognitivement" transparent lorsqu'on ne peut plus interpréter la perception sans prendre en compte des conditions environnantes particulières : distance très grande entre émetteur et récepteur, obstacles... "Comme les milieux ne sont perçus que lorsqu'ils perdent leur transparence cognitive, il suit du principe ci-dessus qu'ils ne sont perçus que dans les conditions défavorables à la perception normale des objets"** (p.63). Reste à savoir comment se définit cette perception normale. Nous ne pousserons pas l'analogie plus loin. En particulier, nous

ne ferons pas comme ces auteurs l'analogie entre *couleur* et *son* d'une part et *lumière* et *onde sonore* d'autre part. L'onde sonore est certes aussi inaudible que la lumière est invisible. En effet, l'une comme l'autre ne peuvent être révélées que par des dispositifs appropriés (dont respectivement l'oreille et l'oeil font partie). Du point de vue de la physique, il est un peu réducteur de ne voir la lumière que comme un milieu informationnel (parce que servant à transmettre de l'information sur les couleurs des objets), de la même façon que l'onde sonore serait un milieu informationnel pour le son. Mais surtout, l'information transmise par la lumière contient bien plus que la couleur. Pour déterminer la couleur il suffit globalement d'un paramètre (la longueur d'onde) alors qu'il en faut plusieurs pour déterminer un son. L'équivalent du son perçu serait l'image entière (avec son contraste, sa luminosité, ses couleurs et contours), l'équivalent de la couleur serait par exemple la hauteur du son perçu (voir ci-après). C'est la totalité de l'image qui serait l'analogue du son, comme résultat pensé d'un flux important d'informations, lumineux ou sonore selon le cas. Les points suivants s'intéressent plus précisément, mais succinctement, aux comparaisons possibles entre les caractéristiques des perceptions visuelles et celles des perceptions auditives. Relier des qualités sonores et des qualités visuelles a été depuis longtemps une activité prisee aussi bien des peintres (Kandinsky, 1954) que des poètes (Rimbaud dans le sonnet "Voyelles" par exemple) mais aussi des physiciens (Malebranche fut le premier à faire l'analogie entre tonalité d'un son et couleur d'une lumière (Taton, 1961)).

Permanence et stabilité. Nous avons déjà discuté de l'évolution temporelle des sons perçus, de leur caractère éphémère en particulier, et de la différence avec les images visuelles. Ce que l'oreille humaine perçoit évolue sans cesse et Chion parle même de la "violence des conditions habituelles d'observations auditives" pour stigmatiser les arrivées et départs soudains de sons, les contrastes entre les phases de silence et de déferlement acoustique. Ces phénomènes, devenus encore plus courants avec les moyens modernes d'écoute, conduisent à craindre fréquemment les sons à venir lorsqu'on n'est pas capable de les prévoir. On peut comparer cette situation aux variations lumineuses intenses et rapides qui seraient l'analogue pour la vue. Les images visuelles, qu'on peut caractériser par les formes, les couleurs, la luminosité, le contraste sont souvent bien plus stables dans le temps. C'est sans doute ce qui faisait dire à Rousseau dans *Essai sur l'origine des langues* : **"Les couleurs sont la parure des êtres inanimés ; toute matière est colorée ; mais les sons annoncent le mouvement, la voix annonce un être sensible"**. Tout au moins pouvons-nous dire que l'être humain a la capacité de décider d'avoir une observation visuelle stable en se concentrant sur l'objet visuel, pouvoir de décision qu'il n'a pas pour les sons. De plus les sons s'enchaînent le plus souvent de façon continue. L'objet sonore évoqué plus haut, défini par ses limites temporelles, est donc bien souvent difficile à identifier. Mais Chion précise alors que **"même quand il occupe une durée courte, l'objet sonore demeure autrement plus malaisé à observer qu'un objet visible, puisqu'il est incorporel et inscrit dans la durée. Le seul moyen de l'observer c'est de le réentendre"** (p. 243). Ceci pose alors le problème de la comparaison des stimuli et de la nécessaire mémorisation "technologiques" des sons ou images. On retiendra de ces réflexions un besoin accru pour le son d'enregistrement mais aussi de représentation des sons dans

le temps qu'on retrouvera dans l'enseignement de sciences physiques à ce sujet.

Correspondance entre caractères visuels et sonores. La luminosité d'une image et la hauteur d'un son ont souvent été comparées. A une image lumineuse correspondrait un son aigu (de hauteur importante). La métaphore va jusqu'à des utilisations sémantiques révélatrices : on peut dire d'un son qu'il est clair ou même sombre. La question se pose alors de savoir si ces rapprochements ont des fondements purement langagiers ou plus culturels. La thèse défendue par Lakoff et Johnson (1980) tendrait à relier le langagier et le culturel sur ce sujet comme sur d'autres. Mach, cité par Casati et Dokic (1994), relève un trait commun à plusieurs qualités sensibles mentionnant qu'on retrouve l'orientation bipolaire (bas/haut) pour les couleurs (pôles *sombre* et *clair*) et pour les qualités thermiques (pôles *froid* et *chaud*). En ce qui nous concerne, nous nous contentons d'explicitier l'existence de telles corrélations, sans chercher les explications qu'elles pourraient fournir. Ivan Fonagy cité par Chion (1998) dit à ce sujet : ***"la clarté ou l'obscurité du timbre sonore est [...] une métaphore basée sur un phénomène d'audition coloré qui met en rapport la dominance des fréquences élevées avec les couleurs claires. Il s'agit donc d'un phénomène qui exige – au lieu de fournir – une explication"***. En passant certes par la fréquence, la correspondance est ici plutôt faite entre timbre et couleur. C'est en effet un analogie suffisamment répandue pour la mentionner ici. Nous dirons plus loin la difficulté de définition du timbre mais contentons-nous pour l'instant de signaler que, tout en restant subjectif, le lien entre la couleur et le timbre (ou la sonorité) semble pertinent. Kandinsky a ainsi tenté d'attribuer à chaque couleur un instrument de musique (et une figure géométrique). Nous pourrions continuer à chercher les correspondances entre caractères visuels et sonores mais nous n'avons pas besoin dans le cadre de notre étude d'en dire davantage à ce sujet.

1.1.6 Ouïe et autres sens que la vue

Nous avons à ce stade dégagé les liens entre les sens visuels et auditifs. En fait, la perception humaine est souvent plurielle et la construction des représentations du monde est bien souvent le fruit d'un traitement plus ou moins complexe de stimuli différents et complémentaires issus d'un événement unique. Chion (1998) définit quelques perceptions ***"qui ne sont d'aucun sens en particulier, mais peuvent emprunter le canal d'un sens ou d'un autre, sans que leur contenu ou leur effet soient enfermés dans les limites de ce sens"*** (p. 56). Il appelle ces perceptions *trans-sensorielles* et cite parmi elles la matière, la texture, le rythme ou l'espace. Il ne faut donc pas perdre de vue que la perception par un seul canal est rarement réalisée mais plus souvent influencée par la perception du même événement par un autre sens.

Nous avons déjà rapproché l'odorat et l'ouïe au sujet de la façon dont ces sens fonctionnent pour localiser dans l'espace (par différence de position). L'ouïe entretient une relation étroite avec le toucher. Ceci est manifeste lorsqu'on touche réellement un émetteur sonore. La vibration est très bien perçue, y compris pour des fréquences assez hautes (cependant inférieures à environ 1000 Hz) et la perception du son peut s'en

trouver troublée. La relation est plus subtile et moins évidente lorsqu'il s'agit de percevoir la présence d'une onde sonore par vibration corporelle (ou dans des cas plus rares par observation visuelle de mise en vibration d'un objet matériel par l'onde). Ces "co-vibrations", comme les appelle M. Chion (1998), permettent par exemple aux sourds de percevoir certains sons. Ces co-vibrations ont surtout lieu pour des fréquences assez basses et leur existence dépend aussi de l'amplitude des vibrations. La voix de tout locuteur s'accompagne inévitablement de co-vibrations (vibrations interne du corps, en particulier au niveau du larynx). Outre le fait que ces co-vibrations sont utiles pour associer une vibration à tout son, il est intéressant de noter qu'elles peuvent fournir des informations sur le son qui ne sont pas recueillies par "la fenêtre auditive" (système qui traite l'information passant par l'oreille). Il y a alors un couplage entre audition et co-vibration qui permet d'obtenir des informations complémentaires et qui finit par *faire* la perception. L'exemple du diapason est à ce sujet parlant. Les informations obtenues en posant le diapason en vibrations sur une partie du corps ne sont pas les mêmes que les informations auditives obtenues en le posant sur un objet solide. Le toucher peut même fournir des informations que l'ouïe n'est plus capable de recueillir. Par exemple, si l'on entend pas le son d'une guitare dont on a gratté doucement une corde, on peut sentir la vibration en posant le manche sur les dents. Pour bien distinguer les deux canaux d'information, Chion (1998) propose de ***"supposer que les sensations simultanées d'images acoustiques [...] et de co-vibration corporelle ne sont identifiées l'une et l'autre et désignées du même mot de "son" – alors qu'elles sont profondément différentes – que parce qu'elles sont ressenties comme l'effet de mêmes causes et se produisent simultanément"*** (p.54). Il ne faut donc pas oublier que les sons peuvent être plus souvent qu'on ne le croit bi-sensoriels (ou même ce que Casati et Dokic appellent des *sensibles communs*, perceptibles par plusieurs sens).

I.2 Des sons à décrire

La partie précédente a permis de dégager et d'explicitier les différents aspects du son qui vont pouvoir être envisagés dans la suite de notre travail. Ont également été mis en évidence la complexité de délimitation de cette vaste notion de son et les relations complexes qu'elle entretient d'une part avec les autres perceptions humaines d'autre part avec les individus. Ainsi, décrire et analyser les sons (sans préciser quelle facette du son on considère), étape indispensable à une meilleure compréhension de ce que sont les sons, devient un leurre si l'on ne considère pas différents "objets" à décrire. L' "objet sonore", l'*auditum* ou encore l'effet perceptif ne peuvent pas être décrits avec les mêmes outils conceptuels que l'onde sonore correspondante ou que le comportement de l'objet émetteur du son, dans la mesure où les "objets" à décrire sont différents.

I.2.1 Problèmes posés par une description phénoménologique des sons: objectivité et subjectivité

I.2.1.1 Tentative de définition d'une description phénoménologique des sons

En tenant compte de ce qui vient d'être dit, on s'intéresse dans cette partie à l'analyse de

ce que pourrait être une description phénoménologique des sons perçus. Il n'est pas nécessaire de développer très longtemps les avantages d'une classification et d'une description stabilisée et partagée par le plus grand nombre. Ceci permettrait en effet d'analyser les sons perçus, certes, mais aussi de communiquer à leur sujet ou encore de les synthétiser numériquement. On verra que l'emploi du conditionnel n'est ici pas superflu puisque de tels critères de description sont encore en débat et ne sont pas partagés par toutes les catégories de praticiens du son et par toutes les disciplines évoquées au § 1.1.2. Reste à savoir ce que serait une description *phénoménologique* des sons.

Une première définition de la phénoménologie, largement admise, mais encore bien peu précise pourrait être "Théorie de l'apparence" (Encyclopédie Universalis, *phénomène*). Merleau-Ponty décrit dans l'avant-propos de sa *Phénoménologie de la perception* (1945) sa vision de la phénoménologie. Elle serait une **"philosophie pour laquelle le monde est toujours "déjà là" avant la réflexion, comme une présence inaliénable, et dont tout effort est de retrouver ce contact naïf avec le monde pour lui donner enfin un statut philosophique. [...] C'est l'essai d'une description directe de notre expérience telle qu'elle est, et sans aucun égard à sa genèse psychologique et aux explications causales que le savant, l'historien ou le sociologue peuvent en fournir"**.

Pour avancer dans la définition de ce que nous entendrons par la suite par phénoménologie, nous citons le passage suivant de *La philosophie du son* (Casati & Dokic, 1994), qui contextualise le point de vue de Merleau-Ponty dans le cas du son :

La plupart des descriptions des phénomènes sonores que je suis capable de donner sont tributaires de ma familiarité perceptive avec eux. Si quelqu'un me présente un Do et un Si l'un après l'autre, je peux remarquer une différence (ils m'apparaissent comme différents), même si je suis incapable d'expliquer, par exemple en utilisant une description qui fait appel aux fréquences vibratoires, la base physique de la différence. La description et l'analyse de ce qui m'apparaît, de ce que j'ai l'impression de percevoir - indépendamment de ce que j'apprends sur une base non perceptive, par exemple en lisant un livre de physique - relève de la partie phénoménologique d'une recherche philosophique. (p. 11).

Même si notre recherche n'est pas philosophique, nous pouvons reprendre à notre compte le fait qu'une description phénoménologique du son est d'abord basée sur la perception et l'impression. Mais, au regard de notre sujet d'étude, nous prendrons nos distances avec ces définitions en ne mettant pas à l'écart de la perception les conceptions ou ce que nous appellerons plus loin les systèmes explicatifs des individus. Ainsi, tout en considérant que la démarche philosophique, qui tend à poser le problème de la nature du perçu en termes de relation d'un objet et d'un sujet, est un cadre de réflexion intéressant, il nous paraît important de ne pas opposer analyse phénoménologique et analyse physique, surtout sur un sujet comme le son (Merleau-Ponty n'hésitait pas à affirmer : **"La phénoménologie, c'est d'abord le désaveu de la science"**). Plus précisément, il serait dangereux d'enfermer le point de vue phénoménologique dans quelque chose de "naïf" et "premier" pendant que le point de vue physique serait considéré comme réfléchi, élaboré et bien plus conceptuel. La possibilité évoquée en philosophie d'une description **"des choses elles-mêmes en dehors de toute construction conceptuelle"** (extrait du sens philosophique de "phénoménologie" donné par le Petit Robert, 1993) nous paraît quelque

peu illusoire aussi bien pour le physicien que pour l'apprenant. En effet, le physicien peut avoir une phénoménologie imprégnée de connaissances parfaitement intégrées qui lui donnent l'impression de percevoir de telle ou telle façon. En un sens, il ne peut pas faire autrement (à moins d'aborder lui-même la question d'un point de vue philosophique) et mettra donc facilement en oeuvre ce que Martinand (1992) appelle une phénoménographie, **"description empirique mais déjà conceptualisée"**. L'élève en situation d'apprentissage, quant à lui, n'a pas les moyens d'aborder son expérience sensible sans prendre en compte les conceptions préexistantes qu'il possède inévitablement.

Nous nous placerons donc ici davantage dans un cadre un peu plus ancien que celui des définitions philosophiques modernes, en rejoignant **"le schéma, à la fois grec et ancien, de la participation de l'extérieur et de l'intérieur, ou de l'objectif et du subjectif, à l'élaboration du phénomène"** (Encyclopédie Universalis, *phénomène*, p. 942).

1.2.1.2 Objectivité et subjectivité

La réflexion précédente pointe un problème plus général auquel se confronte l'espérance un peu naïve dans une description issue de l'expérience *seule*. Comme nous l'avons déjà dit, ce que je perçois dépend aussi de paramètres qui me sont propres. On distinguera parmi ces paramètres ceux qui me sont propres par rapport à quiconque dans la même situation spatiale (même situation de perception, on parlera alors de subjectivité "forte" pour évoquer ces variations interindividuelles) de ceux qui me sont propres par rapport à quiconque observant les mêmes phénomènes avec un autre point de vue spatial (on parlera alors de subjectivité "faible" ou de subjectivité contextuelle). Le point de vue objectif, quant à lui viserait à étudier l'indépendance existentielle de l'événement sonore (Casati & Dokic, 1994) et ses caractéristiques. La physique vise également ce type de description mais se donne pour ceci des moyens expérimentaux dont l'observation et l'analyse sont inévitablement quelque peu subjectives. Le problème est légèrement différent pour la physique scolaire. Nous verrons que la nécessaire corrélation avec l'écoute auditive imposée par le savoir scolaire rend difficile l'élaboration d'un point de vue "objectif". Comme le disent Casati et Dokic (1994), **"un objet sensible ne peut pas être complètement dépendant, spécifiquement parlant, du sujet percevant ; sinon, on voit mal comment l'objet pourrait relever d'une espèce capable d'exister indépendamment de tout sujet percevant"** (p. 179).

Il ne faudra donc pas s'étonner de trouver dans la suite de ce travail une association parfois schématique entre la facette "physique" du son (le son comme l'ensemble des événements hors de la sphère auditive) et une certaine objectivité (ou indépendance existentielle). De même la subjectivité sera évoquée plutôt en relation avec la facette perceptive du son.

Les possibilités de description des sons perçus existent **"parce que l'indépendance existentielle est compatible avec une certaine dépendance spécifique entre l'objet sensible et le sujet percevant"** (Casati & Dokic, 1994, p. 179).

C'est cette compatibilité qui est mise en débat dans ce qui va suivre. Dans un

processus d'apprentissage, la physique ne peut en effet pas s'affranchir de cette relation entre sujet percevant et objet sensible. Mais avant d'aborder l'étude de ces relations entre un point de vue "objectif" et un point de vue plus "subjectif", il est important de rappeler dans quelle mesure ils s'influencent mutuellement.

1.2.1.3 Influence mutuelle des descriptions des différentes facettes du son

Les développements du paragraphe 1.1. permettent de comprendre que la description d'un des facettes du son ("objet sonore" perçu ou objet physique événementiel) peut influencer fortement la description de l'autre facette du même événement sonore (cf.figure 11-3). La façon dont je décris ce que je perçois peut avoir par exemple des conséquences importantes sur ma description du déplacement du son. Par ailleurs, comme on l'a vu, les informations recueillies au sujet d'une situation donnée par d'autres canaux qu'auditifs peuvent influencer la description qui est faite, et pas seulement par processus métaphorique.

Avant d'aborder plus précisément la description des sons perçus, il est utile de signaler que les descriptions des sons perçus d'une part, des processus physiques d'autre part s'enrichissent mutuellement :

"La phénoménologie a une valeur heuristique dans la psychologie de la perception : la psychologie découvre souvent de nouveaux mécanismes perceptifs en étudiant le décalage entre la description (physique) du stimulus et la description (phénoménologique) du contenu de la perception." (Casati & Dokic, 1994, p. 12).

Le décalage qui est mentionné ci-dessus est suffisamment important pour avoir permis l'émergence de la discipline "psychoacoustique", qui vise à étudier les relations entre les grandeurs physiques du stimulus et les sensations auditives. En effet décrire les sons peut être réaliser par la description de leur facette physique et/ou de leur facette perceptive. Ceci posent des problèmes importants qui tiennent en particulier à la nature de la relation que les humains entretiennent avec eux et dont il est préférable d'avoir conscience avant d'exposer des propositions d'outils descriptifs. Nous donnons juste ici quelques points (parfois déjà mentionnés) qui illustre la relative difficulté à décrire une facette sans penser à l'autre.

En premier lieu, les phénomènes sonores sont relativement peu reproductibles, à moins bien sûr d'utiliser un support, magnétique ou numérique, d'enregistrement. C'est d'ailleurs cette difficulté de reproductibilité "naturelle" qui permet d'expliquer le rapide développement de ces techniques de stockage et reproduction. Ce type de difficulté est bien moindre dans le cas visuel où les objets à observer bénéficient plus facilement d'une stabilité accrue et d'un contexte plus reproductible (si je reviens dans une pièce qui n'a pas été modifiée, je revois la même chose). Quand bien même on utilise un tel support pour fixer un son, les conditions d'enregistrement, de création (lecteur et haut-parleur par exemple) et d'écoute (organisation spatiale par exemple) ne permettent que rarement de se retrouver dans une situation sonore identique à la situation à mémoriser.

On peut également inclure dans le contexte les sons entendus avant et les sons qu'on peut s'attendre à percevoir après. L'*écoute répétée* des sons fixés évolue au fur et à

mesure des "lectures", en particulier par anticipation. Il existe aussi des sons dont on ne prend conscience que parce qu'ils s'éteignent. On a déjà dit qu'un auditeur pouvait instinctivement diminuer la perception d'un son chronique ou d'un son qu'il s'attend à percevoir par indice visuel. Le *contexte visuel* influence également la description qu'on peut faire des sons, par utilisation métaphorique de ce qui est vu. Un son peut être désigné comme dur parce que l'objet frappé oppose une certaine résistance. Un frottement, un claquement peuvent désigner un son. Se trouver dans un grand local vide peut induire un repérage et une mention plus aisée de l'aspect résonnant des sons perçus. Citons également l'influence des *gestes et actions* conduisant à la création sonore. Chion (1998) cite l'exemple d'étudiants qui, frappant brusquement un objet qui prolonge sa résonance n'entendent pas cette résonance du fait de la brièveté du geste. On pourrait multiplier les exemples et Chion résume l'importance de ce qu'il appelle la boucle ergo-auditive en présentant le son comme **"associé à un feed-back constant de nos attitudes, gestes, et simples déplacements"** (p. 93).

Enfin, il faut garder à l'esprit que l'audition se fait toujours avec un *vécu auditif*. Les sons perçus antérieurement peuvent en effet rendre une écoute plus ou moins désagréable. L'auditeur peut être énervé ou terrifié par des bruits ou des sons qui paraissent anodins ou "inoffensifs" à un auditeur au passé auditif différent. Ce passé va même jusqu'à commander par enchaînement logique des comportements souvent non réfléchi (fuite, panique mais aussi bien-être) dans un contexte sonore donné. Il est donc très difficile d'avoir devant les sons une attitude *désaffectivée* (Chion, 1998). Et sans même parler de sensations affectives, Chion n'hésite pas à affirmer que la perception est **"aux trois quarts une pré-perception"**. **"Ce que nous entendons s'inscrit de plus en plus, au fur et à mesure que nous grandissons puis vieillissons, dans une grille toute préparée"**, grille qui nous permet par exemple de "restaurer" des messages verbaux ou musicaux incomplètement perçus.

1.2.2 Description des sons perçus

Pour étudier les sons, communiquer à leur sujet, les reproduire ou plus simplement pour désigner des sons ou des objets qui les ont émis, on est contraint de chercher à définir les caractères sonores perçus. Ce qui a été exposé dans les parties précédentes permet d'affirmer qu'une description et une verbalisation des sons la plus objective possible demanderait de déconditionner l'écoute, d'oublier le passé auditif, ou de s'affranchir du contexte visuel et sensitif en général. La tâche étant irréalisable, il faut bien faire avec ces contraintes pour tenter une description la plus fidèle possible des sons écoutés.

Il n'y aura rien d'étonnant non plus à ce que la description des sons perçus à l'aide des caractéristiques de la facette physique des sons s'avère incomplète et le plus souvent inadaptée.

Nous nous restreignons ici à la description conceptuelle et langagière des sons perçus, dans l'acception la plus large de cette expression. Nous n'abordons pas, en particulier, les possibilités de représentations sémiotiques que nous évoquerons dans le chapitre suivant.

1.2.2.1 Les insuffisances des critères classiques

Pour mener à bien la description des caractères sonores perçus, pour aboutir à des critères de description les plus fiables et les moins subjectifs possibles, l'entreprise peut d'abord consister à corréler ce qui est perçu et les phénomènes physiques (événementiels) source des sons perçus, autrement dit à mettre en relation les causes et les effets. Il est en effet tentant de penser que la perception auditive est la perception d'événements physiques réels et donc objectifs, et de croire par suite que la description de ce réel physique suffit à décrire les sons perçus, éventuellement au prix de traductions purement lexicales. Le paragraphe 1.2.1 permet dès à présent de comprendre que cette "objectivation" à partir de la source tangible ou même du stimulus ne peut suffire à décrire les sons perçus. Cependant, les critères classiques de description et de classification des sons semblent bien issus d'une telle référence à la description physique des événements. Il s'agit de la *hauteur*, l'*intensité*, le *timbre* et la *durée* (ce sont d'ailleurs les caractères qu'on tente de représenter sur une partition musicale). Même des phénoménologues comme Casati et Dokic (1994) reconnaissent que **"les trois coordonnées qualitatives principales du son sont la hauteur, l'intensité et le timbre"** (p. 109). On a longtemps cherché des lois de correspondance simples entre la cause "onde sonore" et l'effet "sensation". Nous verrons dans le paragraphe suivant qu'une telle entreprise est une gageure et que si des correspondances simples sont parfois énoncées, elles ne sont que des approximations utiles dans bien des situations (en particulier d'enseignement), mais néanmoins erronées.

Nous verrons que le savoir à enseigner actuel en physique au lycée porte un intérêt tout particulier à trois de ces caractères sonores classiques (la hauteur, l'intensité, le timbre).

Mais il est relativement aisé d'illustrer l'insuffisance de ces critères pour décrire et discriminer tous les sons perceptibles, en particulier lorsqu'ils ne sont pas musicaux.

Dans un premier temps, nous pouvons signaler que de nombreux bruits n'ont pas de hauteurs précises (c'est d'ailleurs ce qui détermine, dans la conception musicale, mais aussi physique, qu'un son puisse devenir un bruit). De plus, si tant est qu'on puisse les définir précisément, la hauteur, l'intensité et le timbre d'un son donné peuvent varier de façon continue. Que devient la description d'un tel son avec ces critères ? Ces critères sont également inadaptés à la description de la parole. Et malgré les essais d'amélioration ad-hoc de cette classification (en particulier celle à 7 critères de Mott, cité par Chion), il reste toujours une grande catégorie de sons quotidiens indescriptibles par cette grille d'analyse. Nous verrons que ceci n'est pas sans peser sur le choix des sons "scolaires" d'étude dans la mesure où cette grille est sensiblement celle adoptée par le savoir scolaire de sciences physiques.

Quand bien même on propose l'écoute de sons auxquels on pourrait *a priori* attribuer une hauteur, une intensité, une durée et un timbre (des sons musicaux simples par exemple), la psychoacoustique indique de façon définitive que ces quatre paramètres auditifs n'ont pas de correspondants simples et univoques au niveau du comportement physique de la source.

I.2.2.2 Inadéquation avec les critères physiques

Les catégories descriptives traditionnelles sont donc inadaptées à une description minutieuse et large des sons à entendre, parce qu'elles ne peuvent pas rendre compte de tous les sons. On va voir ici en quoi, elles sont également sources d'approximations importantes dans le lien qu'elles sont sensées réaliser avec le comportement physique de la source ou les propriétés physiques du stimulus "onde sonore". On a suffisamment expliqué pourquoi les impressions auditives ne peuvent pas être un rendu fidèle des caractéristiques, par exemple, de la vibration sonore. Comme le signale Michel Chion (1998), **"on a constaté progressivement que la sensation auditive n'est pas le simple compte rendu des variations de sa cause vibratoire, et on a été tenté de chercher la "loi" simple de cette correspondance excitation/sensation"**. Le résumé fructueux mais insuffisant constitué par la loi de Weber-Fechner (qu'on peut résumer par **"la sensation croît comme le logarithme de l'excitation"**) connaît rapidement des limites importantes. Pourtant, comprendre pourquoi on entend tel son plutôt que tel autre ou telle modification sonore impose de faire le lien entre ces deux versants des descriptions sonores. La succession de modifications ad-hoc et expérimentales issues de recherches en psychoacoustique ne suffit pas à mettre en regard de façon simple trois des quatre caractères classiques des sons avec trois paramètres physiques de la vibration cause, comme ceci est encore souvent pratiqué :

Son perçu	Vibration cause (ou onde sonore)
Hauteur	fréquence
Intensité	amplitude
Timbre	"forme" de la vibration ³ ou façon dont ça vibre

Il convient là encore de bien distinguer ce qui relève des phénomènes physiques et ce qui relève de la perception. Sans renier leur utilité en particulier pour l'apprentissage de la physique, l'analyse critique de ces associations vise à faire prendre conscience du caractère simplificateur de ces relations qui ne doivent pas être considérées comme univoques, et qui sont parfois véhiculées par un certain nombre d'expressions courantes (Beaufils, 1998). Ces non-correspondances entre la cause physique et l'effet perceptif sont souvent qualifiées par la physique d'"illusions auditives" alors que Chion y voit une preuve supplémentaire de la nécessité de décrire ce qui est perçu par la quasi-totalité des individus. Cette perception commune assure d'ailleurs d'après lui une certaine objectivité, là où la physique verrait du subjectif (Chion, 1998). La physique (mais est-ce encore de la physique ou bien déjà de la psychoacoustique ?) a d'ailleurs fini par s'intéresser au repérage des relations complexes entre perceptions et signaux physiques, en étudiant par exemple comment l'intensité, le timbre ou la durée influence notre perception de hauteur. Si la physiologie intervient dans le décalage entre perception effective et prédiction de la physique, elle n'est pas seule en cause : nous avons vu comment la vision et le contexte

³ La "forme" de la vibration n'est pas vraiment un paramètre physique au même titre que la fréquence ou l'amplitude mais désigne la façon dont la source vibre, une fois la fréquence et l'amplitude fixées.

d'écoute pouvaient intervenir.

Ainsi, on pourra *considérer* que la hauteur d'un son (son caractère plus ou moins aigu ou plus ou moins grave) varie, dans certaines conditions, avec la fréquence de la vibration source, même si cette dépendance varie selon la gamme de fréquences et si la hauteur est également influencée par l'intensité des sons perçus (plus ou moins selon la fréquence) ; en terme de sciences physiques, ceci s'exprime un peu différemment, comme le fait Michèle Castellengo (1994) : **"le signal effectivement reçu par le capteur auditif dépend des caractéristiques de sensibilité (c'est elle qui souligne) de l'ensemble de la chaîne. Or les "courbes de réponses" sont loin d'être plates, et varient d'un individu à l'autre"**. De plus, comment interpréter les écarts aux théories classiques de l'acoustique musicale comme les perceptions de sons qui semblent "descendre" en permanence, la perception de hauteurs fondamentales qui n'existent pas physiquement dans la vibration de la source mais que l'oreille restitue à partir des harmoniques supérieures (Risset, 1986 ; Lecardonnell, 1994) ou encore la possibilité qu'a l'oreille de distinguer deux notes dans un accord (Chion, 1998) ? Ne faut-il pas dans ces cas-là relâcher le lien strict entre cause et effet ? Quoiqu'il en soit, la hauteur d'un son n'est pas seulement liée à la fréquence de la vibration, même si elle dépend principalement d'elle (Chaigne, 1992). Les psychoacousticiens utilisent d'ailleurs l'expression *perception de la hauteur* (qu'ils appellent la *tonie*), signe que la hauteur devient un paramètre théorique qui serait plus ou moins bien perceptible. Certains vont même, à partir de cas limites, jusqu'à rejeter le lien fait, même avec précaution, entre hauteur et fréquence (Cance, 1994).

Pour ce qui concerne la perception d'intensité sonore (au sens courant du terme, i.e. la sensation du caractère plus ou moins fort), un lien simple entre perception et propriétés vibratoires est encore plus difficile à définir. Disons dès à présent que l'intensité dépend essentiellement de deux paramètres de nature extrêmement différente : l'amplitude de la vibration et la configuration spatiale dans laquelle se situent l'émetteur et le récepteur (distance, "obstacles", réverbération...). Elle dépend de façon plus marginale de notions temporelles, des variations sonores mais aussi de la fréquence (!), sans oublier également les facteurs plus contextuels : l'âge, la fatigue (Leipp, 1989, pp.110-119). Pour rendre compte au mieux de cette perception, la physique a élaboré des concepts "mesurables". La physique a d'abord défini l'intensité acoustique pour prendre en compte l'éloignement de la source puisque cette intensité acoustique n'est rien d'autre que la puissance surfacique de l'onde à un endroit donné de l'espace. Un problème supplémentaire provient ensuite du fait que l'amplitude et la puissance acoustique des sons audibles peuvent varier sur une échelle extrêmement grande (on perçoit des déplacements d'air à partir de 10^{-11} m jusqu'au millimètre, tandis que les puissances acoustiques correspondant aux sons audibles vont de 10^{-12} W.m⁻² à 1 W.m⁻²). Notre perception d'intensité sonore ne varie pas linéairement avec la puissance acoustique "mesurée" par l'oreille : par rapport à un son de 10^{-12} W.m⁻² nous n'entendons pas 1000 fois celui d'une puissance égale à 10^{-8} W.m⁻². L'acoustique a alors cherché à définir une unité qui diminuait ces écarts d'ordre de grandeurs afin de mieux rendre compte de la perception humaine. Si le décibel (dB), l'unité qui fait autorité (y compris pour la loi), réalise cette condition et constitue bien une unité reliée à des paramètres physiques

quantifiables et mesurables (Intensité en dB =FORM01), étant ainsi liée de façon assez stricte à l'amplitude de la vibration, elle ne rend qu'approximativement compte de la perception humaine. A ceci plusieurs raisons : la notion d'intensité dépend aussi de la gamme de fréquence des sons perçus, l'oreille étant moins sensible dans les très basses et très hautes fréquences (une conséquence de ceci est l'utilisation de filtre de pondération qui au lieu de donner des mesures en dB donnent des mesures en décibels "pondérés A", i.e. tenant compte au mieux de la réponse fréquentielle de l'oreille) ; notre *perception de l'intensité* sonore (que les psychoacousticiens appellent la *sonie*, mesurée en *phones*) dépend aussi des variations temporelles des sons, des contrastes forts, des compensations physiologiques de l'oreille (réflexe stapédien en particulier). Quoi qu'il en soit l'outil physique "Niveau sonore en décibel" n'est que très partiellement approprié à rendre compte de l'intensité sonore effectivement perçue.

Nous ne nous intéresserons pas ici à la notion de durée d'un son, qui pose probablement moins de problèmes que les autres facteurs descriptifs, quoique les phases de création d'un son ou de résonance pose des problèmes au lien entre perception et physique.

Par contre, nous dirons quelques mots de la notion de timbre, couramment utilisée, en particulier dans l'enseignement aussi bien oral qu'écrit. Le timbre est souvent invoqué pour séparer (du point de vue de la vibration source) deux sons de même fréquence et de même niveau sonore. Comme l'indique McAdams & Bigand (1994) dans le glossaire de l'ouvrage collectif "Penser les sons", **"Le timbre est classiquement défini par la négative : il représente une qualité perceptive qui permet à l'auditeur de distinguer deux sons strictement équivalents du point de vue de la hauteur, de l'intensité et de la durée"**, définition similaire à celle donnée par l'American Standard Association (citée par Chaigne, 1992). On peut ainsi expliquer qu'un *do* joué à la guitare est différent du même *do* joué à la flûte parce que les deux instruments n'ont pas le même timbre. Comme l'analyse des deux signaux correspondants peut en effet révéler une fréquence et une amplitude commune on en déduit que le timbre serait bien la troisième caractéristique des sons (on ne compte pas la durée) déterminée "objectivement" par la forme du signal (le son "pur", celui du diapason par exemple, correspondant à un signal sinusoïdal). On sait cependant maintenant que cette interprétation, pour commode et simple qu'elle puisse être, ne permet pas de rendre compte de la plupart des situations dans lesquelles un instrument donné est reconnu (sans parler des bruits ou des sons parlés...). On sait en particulier que l'être humain est dans certains cas sensible non pas au spectre en lui-même mais à son évolution dynamique (c'est le cas pour les cuivres par exemple). On identifie le même instrument pour deux spectres totalement différents. On connaît aussi l'importance de l'attaque ou de la décroissance d'une note pour la reconnaissance d'un instrument. Tout ceci conduit les mêmes auteurs à préciser que **"la recherche contemporaine a commencé à décomposer cet attribut en plusieurs dimensions perceptives de natures temporelles, spectrale et spectro-temporelle"**. On peut alors considérer que le timbre n'est aujourd'hui qu'une façon de désigner l'appartenance d'une source à une famille de sources sonores, sans davantage de critères objectifs sur la source sonore. C'est le terme "passe-partout" qui permet de désigner telle ou telle particularité d'un son (le timbre de tel musicien, le timbre de telle marque de guitare). Ce qui fait dire à Chion que **"la notion de timbre est un amalgame sans consistance de**

données diverses", et qu'elle devrait être abandonnée puisqu'elle s'avère, "derrière [sa] fausse évidence, [une] notion causaliste inapte à qualifier le son" (p. 244). Il va même plus loin en suggérant que si cette notion "floue" et "introuvable" perdure, c'est parce qu'elle assure la cohérence de l'édifice permettant de décrire les sons, parce qu'on **"appuie [sur elle] les valeurs, elles, distinctes et repérables de hauteur, intensité, durée"**. La remise en cause de cette notion semble unanime puisque Castellengo (1994), directrice du LAM⁴ dit à propos d'elle : **"son étude est souvent absente des traités de psychoacoustique, car c'est essentiellement un attribut relevant simultanément de toutes les dimensions sonores : fréquence, amplitude, durée. Ce que nous appelons communément le timbre comporte en fait deux aspects. Le premier se réfère à l'identification de la source sonore (causalité) et le second aux changements de qualités que le signal peut subir selon l'espace ou le temps. Nous employons le terme "sonorité" pour l'aspect qualitatif, réservant celui de "timbre" pour l'aspect d'identification"** (p. 206), et encore **"Le timbre et la sonorité sont sans doute les attributs les plus difficiles à traduire et les plus fragiles perceptivement. Ils dépendent plus ou moins consciemment de l'influence des autres sens : un instrument aux belles formes et bien décoré sonne "mieux" que son jumeau acoustique, brut de fabrication"**. Où l'on retrouve l'importance de la perception visuelle sur la perception auditive...

Ainsi la difficulté de définition de la notion de timbre rend à notre avis cette notion difficile à enseigner et pas forcément pertinente, en comparaison des notions de hauteur et de niveau acoustique, pour lesquelles il faudra déjà prendre des précautions de définitions importantes et quelque peu écartée du seul cadre de la physique. Il n'est d'ailleurs pas étonnant de constater que le savoir à enseigner dans les lycées français s'intéresse quasiment uniquement à des sons purs, n'abordant la notion de timbre qu'au moment de l'étude des sons musicaux (voir plus loin). Le timbre est alors le plus souvent corrélé explicitement à la forme du signal vibratoire, ce qui, on l'a vu, peut paraître réducteur.

On voit donc qu'une description "objective" des sons perçus à partir des propriétés physiques des événements causes ne peut être que très imparfaite. Ceci était prévisible dès la fin du § 1.2. Cependant, nous pouvons penser à la suite de Chion (1998) que **"La position consistant à considérer le son comme totalement subjectif et dépendant de celui qui écoute est une fuite commode ; on ne peut pas non plus l'objectiver par référence à des niveaux qui ne concernent pas ce que l'on entend (acoustique). Le son devient objet, comme objet de discours, objet qu'il ne s'agit pas de retrouver (selon le mythe qui fait de l'écoute un "retour aux sources"), mais de constituer culturellement, par un acte à la fois d'attention et de nomination."**(p.316-317). C'est la tâche à laquelle s'est en particulier atteler Schaeffer, en tentant de délimiter une typologie adaptée à l'écoute de n'importe quel son dans l'hypothèse d'une écoute réduite. Même si ce point de vue nous éloigne de la physique, nous en donnons ci-après une très brève description, car elle permet de prolonger la réflexion sur la description des sons.

⁴ Laboratoire d'Acoustique Musicale

I.2.2.3 Vers d'autres descriptions

La diversité lexicale de description des sons perçus est extrêmement grande même si elle n'est pas souvent complètement utilisée. Nous verrons plus loin que même le langage courant utilise un lexique relativement varié pour désigner les sons, même si le lexique disponible à cet effet dans la langue française est certainement sous-exploité (Chion, 1998).

Schaeffer, cité par Chion (1998), distingue trois types d'écoute :

· l'écoute causale qui regroupe tous les indices renseignant sur la cause du son ;

· l'écoute "sémantique" qui vise à décoder un signal sonore tel le langage parlé ;

· l'écoute réduite des sons pour eux-mêmes, dont nous avons déjà parlé.

Dans le cadre de l'écoute réduite, il définit une typologie de classification des sons, bien plus qualitative que quantitative. Pour classer les sons, il définit d'abord neuf catégories en croisant deux paramètres qui peuvent prendre trois valeurs chacune : la masse (la façon dont il se situe en hauteur) et l'entretien (la façon dont il se situe en durée). Puis, pour *décrire* tous les sons, il élabore un "solfège expérimental" qui comporte sept critères morphologiques : la masse (qui généralise quelque peu la hauteur traditionnelle), le profil dynamique (qui contient en particulier le concept d'intensité), le timbre harmonique, le grain, l'allure, le profil de masse et le profil mélodique. Nous ne rentrons pas dans les détails et les définitions de ces concepts mais cette grille est source de réflexion, de notre point de vue, y compris pour la physique et montre qu'il a fallu pas moins de cinq critères pour remplacer ce qui est globalement contenu dans le timbre traditionnel (Chion, 1998).

I.2.3 Description des modes de propagation

Nous avons à ce stade évoqué les particularités et les ambiguïtés du concept "son" et cherché à distinguer les différents aspects qu'il peut contenir. Nous avons en particulier étudié les liens entre les phénomènes se déroulant au niveau de la source et leurs effets perceptifs (et la difficulté de caractérisation de ces liens). Pour rendre complète l'étude de ces relations, il est nécessaire d'aborder le rôle du milieu dans cette relation entre cause et effet. Nous avons déjà mentionné que nous incluons les événements se déroulant dans le milieu dans la facette "cause" du son. L' "objet son" constitue alors l'objet de prédilection de l'acoustique physique. Cette étude peut même s'effectuer en dehors de la considération de toute perception humaine. Nous reviendrons donc tout naturellement plus en détails sur ces aspects physiques de la propagation de l'onde sonore dans le chapitre suivant consacré au regard que la physique porte sur le son.

Il n'est cependant pas dans notre intention de négliger les facultés humaines qui utilisent implicitement des propriétés de la propagation du son parmi lesquelles on peut citer : parler plus fort pour être entendu s'il y a des obstacles, s'attendre à ce que ça

résonne dans une pièce, s'attendre à percevoir un écho, localiser une source sonore dans l'espace. Ces activités sont le reflet de phénoménologie personnelles au sujet du déplacement du son. Mais même si le fonctionnement de la sphère auditive intervient dans ce type de facultés qui nous paraissent innées, nous ne nous intéressons pas ici pour notre sujet aux mécanismes physiologiques et neurologiques qui sous-tendent ces facultés.

La familiarité que l'être humain entretient avec les phénomènes sonores et la prédominance des situations où la transmission paraît instantanée peut lui faire oublier que le son se propage (il n'en a pas forcément besoin pour interpréter ses perceptions). On peut cependant se poser la question de la façon dont l'Homme décrit la transmission des sons, et à partir de quels indices sensibles il formule des descriptions.

Nous avons vu (§1.5) que, comme pour la vue, le milieu et le déplacement ne sont pris en compte que lorsque la modification perceptible auditivement n'est plus imputable à l'objet ou à l'événement source. Ceci en accord avec ce que Casati et Dokic (1994) appellent le principe différentiel : **"à une différence perceptive doit correspondre une différence dans le monde"**. Nous nous contenterons de souligner ici que la relativement grande diversité des termes utilisés pour le déplacement du son (ou ayant un rapport avec une occupation spatiale du son).

La référence à l'espace ou à la distance peut d'abord se manifester dans la description des sons perçus, comme caractère pertinent : on peut dire d'un son qu'il est *lointain*, pour signifier qu'il est faible et mal contrasté ; ou encore qu'il est virevoltant. Certaines expressions utilisent même un lexique qu'on pourrait qualifier de cinétique ou de mécanique, ce qui n'est pas sans ambiguïté du point de vue de la physique : un son *rapide* n'est pas un son qui va vite mais plutôt un son court ou éphémère ; dans un son *en mouvement*, c'est l'aspect changeant qui est signalé, davantage que son déplacement spatial.

Le déplacement en tant que tel bénéficie lui aussi d'un lexique relativement varié. On a déjà signalé la différence sémantique entre "se déplacer" et "se propager" tenant à la nature de ce qui est en mouvement, respectivement plutôt matérielle et plutôt abstraite (l'actant prototypique de la propagation étant l'onde). Mais on peut aussi dire des sons, sans que ce soit d'ailleurs anodin quand à la description du son éventuellement perçu, qu'ils *se répandent*, qu'ils *rayonnent*, *diffusent*, *rentrent dans*, ou encore qu'ils *s'épuisent*. Le champ sémantique des déplacements mécaniques peut aussi être utilisé : un son peut *traverser*, *atteindre*, *aller vite*, *rebondir*, *monter*, ou même *voler*. Lucrèce (1^{er} s. av. J.-C.) explique déjà dans *De natura rerum* que **"les sons destinés à notre oreille cheminent (c'est nous qui soulignons) plus lentement que les images capables d'émouvoir notre vision"**. La force des métaphores s'exprime largement ici, et l'utilisation de telle ou telle expression révèle bien souvent les pensées du locuteur au sujet du son (Lakoff & Johnson, 1980).

Enfin, les expressions plus techniques permettent de décrire le son en mouvement. En effet, le physicien parlera, outre de la *propagation* de l'onde sonore, de possibles *réflexions*, *diffraction*, *atténuation*, *absorption* de l'onde, actions qui sont subies par l'onde sonore mais n'en sont pas moins liées à son aspect dynamique. Nous n'en dirons pas

plus dans cette partie sur ces phénomènes qui d'une part concernent essentiellement la physique, d'autre part implique aussi la matière en interaction avec le son, dont nous parlons dans le paragraphe suivant.

Quoi qu'il en soit, ces descriptions plus ou moins courantes de l'aspect mobile des sons pose le problème du statut de l'objet "son" dans toutes les expressions citées ci-dessus. Pas vraiment perception puisque situé hors de l'oreille, pas vraiment onde sonore bien conceptualisée si on ne se place pas dans le cadre de l'acoustique physique, quelle peut être la nature de l'objet qui est pourtant mis en scène ? De la matière, de l'énergie, de l'information, une sorte de vent ? On verra que la délimitation de cet objet, souvent plus hybride que bien défini, n'est pas simple et qu'elle n'est pas sans poser des problèmes importants à l'apprentissage.

I.2.4 Description des interactions son – monde matériel

Les phénomènes impliquant l'objet physique son dans des interactions avec le monde matériel sont probablement moins décrits dans la vie quotidienne (ou hors champ scientifique) comparés aux autres phénomènes sonores, même si leurs applications sont nombreuses (localisation, cartographie, médecine). Encore faudrait-il savoir ce que nous entendons par "interactions avec le monde matériel" si nous ne souhaitons pas travaillé avec une définition trop vaste. En effet, le simple événement de création sonore, qui a toujours une base matérielle pourrait à la limite rentrer dans cette catégorie. Nous l'excluons cependant et considérons plutôt, en plus du déplacement du son dans un milieu donné, toutes les modifications de l'objet physique "onde sonore" dues à l'environnement matériel de la situation. Puisque nous avons parlé dans le paragraphe précédent des descriptions de la propagation dans un milieu donné, nous nous intéressons plus particulièrement ici à l'influence de l'environnement matériel, identifié comme tel (influence des objets et matériaux visibles, essentiellement). Le vocabulaire courant utilisé alors provient alors essentiellement de métaphores mécaniques (le son *rebondit*, *ricoché*, *est renvoyé*, *est canalisé*, *traverse*), ou d'un champ lexical propre au phénomène sonore (le son *résonne*, il y a de la réverbération, ça fait de *l'écho*...) mais emprunte aussi plus rarement à un champ lexical décrivant des comportements humains (le son *s'évanouit* dans, *s'épuise* dans). Ces exemples ne visent pas l'exhaustivité. En particulier on n'oubliera pas des expressions telles que "le son est absorbé" qui peuvent être utilisées dans d'autres contextes, souvent assez scientifiques. En fait, pour décrire l'interaction entre le son et la matière (et en avoir conscience), il est souvent fait appel à du vocabulaire technique. Sans citer tous les concepts plus ou moins techniques mentionnés par la physique sur ce sujet, on pourra penser simplement à la *transmission*, l'*absorption*, la *dispersion* (au sens de la physique des ondes), la *réfraction*, ou encore la *focalisation*.

Cependant, on n'oubliera pas que, malgré leur faible occurrence, ces expressions peuvent *a priori* avoir une influence forte, lorsqu'elles sont utilisées sur la représentation du son chez le locuteur (et par suite pour l'interlocuteur). Ces descriptions, en particulier celles qui de nature métaphoriques, ne sont pas anodines et peuvent à la fois induire et être contraintes par des idées plus ou moins précises sur l'objet physique "son". Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point dans le chapitre sur la revue des conceptions au

sujet du son.

Chapitre II Son et enseignement de la physique

Le chapitre précédent a permis de montrer la complexité des analyses des phénomènes sonores et la diversité de points de vue à leur sujet. Il permet ainsi de faire entrevoir les difficultés auxquelles va se confronter un enseignement pour débutant, en particulier si l'objet d'étude n'est pas bien défini. L'articulation entre facette "objective" et "facette subjective" du son, loin d'être passée sous silence, doit être traitée ou au moins prise en compte dans une stratégie d'enseignement. Nous proposons dans ce chapitre d'étudier ce que la physique, aussi bien savante que scolaire, propose de traiter, dans quelles conditions, et avec quelles contraintes. Comme il a déjà été dit, c'est donc davantage du son comme onde sonore (et plus généralement comme cause des sensations auditives) dont il va être question ici. Il n'est pas question pour autant d'oublier la perception. Mais la physique s'intéresse d'abord aux aspects les plus "objectifs" possibles des sons et comme le dit Leipp (1989), malgré le rapport personnel aux sons ***"il n'en reste pas moins que des phénomènes objectifs, qui sont à la base de la musique et de l'acoustique, sont fondamentalement liés à des combinaisons de grandeurs physiques"*** (p. 5).

II.1 Brève histoire de l'acoustique et de son enseignement en physique

II.1.1 Histoire de l'acoustique : une discipline qui paraît "vieille"

Pour mieux comprendre ce que la physique se propose d'étudier dans la sphère sonore, nous effectuons ici un rapide tour d'horizon du développement des idées et des concepts au sujet de l'acoustique. Nous nous restreignons au champ de l'acoustique physique ainsi qu'à quelques avancées significatives dans le champ de l'acoustique musicale. Loin de nous, cependant, le projet de faire un quelconque parallèle entre développement historiques des idées et apprentissage de l'élève. Cette approche, qui a pu séduire certaines recherches en didactique, a largement montré ses limites, ne serait-ce que par les différences dans le rapport au savoir du chercheur (ou savant d'une part), de l'élève d'autre part : l'un élabore de nouveaux savoirs, l'autre doit s'approprier des savoirs qu'il sait préalablement existants (Johsua & Dupin, 1993, p.136). Même si l'approche historique permet dans certains cas d'indiquer quels aspects du corps de connaissances sont *a priori* les plus délicats, nous verrons davantage ce panorama historique comme un moyen de dégager les savoirs de la physique au sujet du son, en repérant en particulier un noyau dur historique de savoirs.

Sauf mention de références supplémentaires, l'essentiel des informations mentionnées dans ce paragraphe est issu de l'article *acoustique* de l'Encyclopédie Universalis, de l'ouvrage complet (en 4 volumes) de René Taton *Histoire générale des sciences* (1961), de l'ouvrage *Acoustique et électroacoustique* (1965) de Matras ainsi que

du remarquable travail collectif réalisé à l'INRP par Daniel Beaufile et Marcel-Jean Vilcosqui (1998) sur les relations entre physique et musique, consultable en ligne.

II.1.1.1 Une discipline moins tourmentée que d'autres

L'acoustique est peu décrite dans les ouvrages classiques d'histoire des sciences ou de la physique. Ceci peut être l'indice d'une progression historique sans grand rebondissement, sans débat de fond entre courants de pensée comme on peut en rencontrer avant une révolution scientifique (Kuhn, 1983). L'histoire de l'acoustique semble ainsi moins perturbée que celle de l'optique ou de la mécanique par exemple. Elle ne semble pas avoir connu de crise majeure ayant eu pour suite l'adhésion de la communauté scientifique à un nouveau paradigme.

L'Homme s'intéresse aux phénomènes sonores au sens large depuis trop longtemps pour qu'on puisse réellement dater cet intérêt. La formule consacrée voudrait qu'on dise alors que les interrogations de l'homme à ce sujet, même sans revêtir de caractère scientifique au départ, remonte à la nuit des temps. L'être humain devint également très tôt expert dans la création de sons harmonieux puisqu'il est possible de retrouver des sortes de flûtes ou de percussions (peaux tendues le plus souvent) dans les traces des plus vieilles civilisations connues. L'intérêt était donc avant tout musical, festif ou sacré, bien plus que scientifique. Cependant les premières réflexions d'ordre scientifique sur le sujet sont également inspirées, et ceci pendant assez longtemps, par le rapport à la musique ou aux sons harmonieux.

II.1.1.2 Les prémices de l'Antiquité au Moyen-Age : la musique comme stimulant

Les premières recherches connues qu'on peut qualifier de scientifiques portent en effet sur le comportement des cordes vibrantes en relation avec les sons qu'elles émettent. Ces premières analyses datent de l'école pythagoricienne (VI^e siècle avant JC) avec en particulier le premier ouvrage connu d'acoustique *Harmonique* par Aristoxène à la fin du IV^e siècle avant JC. La notion de gamme, en relation étroite avec des rapports numériques des longueurs des cordes ou des flûtes, est élaborée à une époque qui porte beaucoup d'attention aux nombres. C'est aussi de cette époque que datent les premières mises en relation du caractère aigu d'un son et de la fréquence de vibration d'une corde (Archytas de Tarente) (Ronan, 1988). L'intérêt porté aux instruments et les progrès de ce qu'on appellerait aujourd'hui l'acoustique musicale s'accompagnent tout naturellement de progrès importants dans la fabrication des instruments (les premiers orgues datent du premier siècle avant JC à Alexandrie). Il ne faut pas oublier non plus dans le domaine purement technique le savoir-faire assez remarquable dans l'antiquité quant à l'acoustique des lieux de spectacles. Si les premières recherches sont donc d'abord motivées par une certaine compréhension et amélioration de l'esthétique musicale, il n'en reste pas moins que la nature ondulatoire du son est également avancée durant cette période. Le rapprochement avec les ondes à la surface de l'eau date en particulier de cette époque. Si l'on peut discuter, au regard de ce que l'on sait aujourd'hui du caractère de preuve des arguments avancés à l'époque pour affirmer que le son est une onde, il faut au moins reconnaître la référence à des analogies avec d'autres phénomènes ondulatoires et le fait

que l'on cherche déjà à comprendre le déplacement du son. Aristote, en particulier, voit la source comme "poussant vers l'avant l'air contigu de telle manière que le son voyage..." (cité par l'encyclopédie Universalis) et observe que les sons aigus vont à la même vitesse que les sons graves. Enfin, concernant cette période de l'Antiquité, il ne faut pas oublier les développements qui eurent lieu en Chine, motivés également semblent-ils par un souci premier esthétique, et portant davantage sur la relation entre les sons (sons qui vibrent en résonance) que sur des sons isolés (Ronan, 1988).

L'acoustique, qui est alors suffisamment développée pour bénéficier d'une reconnaissance en tant que domaine scientifique, est vue comme une discipline majeure au Moyen-Age. Même si elle apparaît plutôt sous le terme de *musique*, elle fait partie à cette époque du *Quadrivium* (avec l'arithmétique, la géométrie et l'astronomie), base de l'enseignement scientifique dans les universités. Paradoxalement ce statut ne va pas contribuer à son essor mais en faire plutôt un objet figé. Il faudra attendre le début du 17^e siècle pour assister à un nouvel élan dans la discipline. On attribue généralement au père Marin Mersenne (1588-1648) ce renouveau (certains disent même la naissance) de l'acoustique.

II.1.1.3 Le renouveau de l'acoustique : un contexte mécanique et mathématique

Mersenne publie *Harmonie universelle* en 1636 et on peut dire que c'est à partir de ce moment que l'acoustique devient un domaine bien plus lié à la mécanique en plein essor (dont elle va vite constituer une branche) qu'à la musique. En effet, si Mersenne s'intéresse aussi aux phénomènes musicaux, il essaie d'en comprendre le fonctionnement et il s'attache en particulier à étudier ce qui se passe dans le milieu de propagation, en menant des expériences minutieuses. Il explicite en particulier l'égalité de la fréquence du mouvement vibratoire de l'air et celle de la vibration du corps excitant l'air. Il mit aussi en évidence le lien privilégié entre fréquence de la vibration et hauteur (caractère aigu-grave). Il serait bien entendu injuste et inexact d'attribuer au seul Mersenne ces résultats issus de l'acquis des siècles précédents. Galilée (1564-1642) s'est lui aussi intéressé au même moment à ces problèmes en mettant en lumière l'importance de la notion de fréquence, ou encore en décrivant le phénomène de résonance entre deux corps vibrants. Galilée publie en 1638 *Discours mathématique concernant deux sciences nouvelles*. Le titre de cet ouvrage rend compte de l'apparition d'un formalisme mathématique omniprésent (pour ne pas dire systématique) et qui ne quittera plus le domaine de l'acoustique. Mersenne lui-même, dans la tradition mécaniste de l'époque (le but de la science serait de trouver les relations mathématiques entre les grandeurs physiques gouvernant les choses), a abondamment recours au formalisme mathématique. Cependant Locqueneux (1987) explique que pour Mersenne, si la **"science s'attache à la partie mathématisée ou pressentie comme mathématisable de la connaissance", "la fécondité de la traduction mathématique des phénomènes ne peut faire oublier la réduction qui est ainsi opérée sur la réalité : l'abstraction qui fait du son un ébranlement de l'air laisse la sensation en dehors de la science"** (p. 39).

Le fait que le son possède un caractère ondulatoire est renforcé par ce renouveau de

la discipline, en particulier par recours aux analogies. Le rapprochement est en effet réalisé entre le caractère ondulatoire et ce qu'on connaît alors des ondes, qui est également rencontré pour le son : il peut contourner des obstacles, interférer avec lui-même, se diffuser dans toutes les directions. Les recherches de Otto von Guericke sur le vide (en 1650) poursuivies par celles de Boyle (en 1660) qui enferme sous une cloche à vide une petite horloge, permettent de montrer la nécessité d'un milieu matériel pour que le son se propage et finissent de convaincre la plupart des savants de l'époque de la nature ondulatoire du son. Cependant, certains s'opposent à ce point de vue, et tout particulièrement Gassendi (1592-1655). "Atomiste" convaincu, il explique que le son serait **"dû à un courant d'atomes émis par l'objet sonore ; célérité et fréquence du son étaient interprétées respectivement comme la vitesse des atomes et leur nombre émis par unité de temps..."** (Encyclopédie Universalis, p. 177). Nous soulignons ici ce point de vue pour l'intérêt qu'il représente quant aux conceptions de l'apprenant qu'il est possible de mettre en évidence (voir plus loin).

Cependant, l'acoustique ne connaîtra jamais les polémiques et les affrontements qui aboutirent à fonder l'optique moderne puis l'électromagnétisme. En quelque sorte, l'aspect corpusculaire du son ne fit jamais vraiment recette dans les milieux scientifiques et c'est dans le cadre de l'aspect ondulatoire que l'optique et l'acoustique étaient mis en regard. Huygens (1629-1697), ainsi que Euler (1707-1783), explicitait même l'analogie en faisant des deux types d'ondes des phénomènes similaires de vibration des molécules des corps élastiques dans le cas du son, de l'hypothétique éther dans le cas de la lumière. On sait que ce dernier point de vue dut être remis en cause plus tard.

La fin du 17^e siècle et le 18^e siècle sont consacrés au développement de la théorie mathématique de la propagation du son. S'étant nettement affranchi des rapports privilégiés qu'elle entretenait avec la musique, l'acoustique fait dès lors partie de la mécanique et il n'y a rien d'étonnant à constater que les avancées significatives sont réalisées par des savants souvent cités en mécanique. Le mouvement est initié par Newton (1642-1727), qui en 1686 proposa une explication du mécanisme de propagation (des chocs se propageant de molécules en molécules) et affirma que la vitesse de propagation était proportionnelle au quotient de la racine carrée de l'élasticité par la densité en faisant l'analogie avec des ondes longitudinales sur un ressort continu (Modèle de Newton). Notons qu'à la fin du 17^e siècle, par suite du refus d'accorder à l'eau et aux liquides une élasticité, la propagation du son dans les liquides était également niée (jusqu'en 1743). La formule de la vitesse dans l'air ne fut mesurée expérimentalement qu'après les travaux de Newton : on peut par exemple citer une mesure effectuée en 1738 par Cassini, Maraldi et Lacaille bien meilleure (337 m.s^{-1} dans l'air) que toutes celles effectuées jusqu'alors (Taton, 1961). C'est finalement Laplace, en 1826, qui accorde les nouvelles mesures et la formule théorique en remplaçant la compressibilité isotherme par la compressibilité adiabatique dans la formule établie par Newton. L'acoustique bénéficia du développement du formalisme mathématique ondulatoire de la théorie des champs (physique du continu), en particulier avec les développements de Lagrange (1736-1813) et d'Alembert (1717-1783). Ce dernier explicite et intègre l'équation aux dérivées partielles à laquelle il a laissé son nom. Daniel Bernoulli (1700-1782) et Euler (1707-1783), dont les noms évoquent la mécanique des milieux continus, s'intéressèrent d'un point de vue

mathématique aux phénomènes vibratoires complexes, en particulier dans des solides aux formes variées.

II.1.1.4 Du 19^e siècle à nos jours : avancées techniques et analyse des vibrations

Les bases théoriques ayant été jetées, le 19^e siècle est celui des développements techniques d'une part, du retour des recherches théoriques concernant le rapport phénomènes – perceptions d'autre part.

Tout d'abord, des mesures de plus en plus précises de la vitesse du son sont réalisées. On peut citer en Europe les mesures de Arago, Prony et Gay-Lussac le 21 juin 1882 en France ou celles de Régnault autour de 1860 dans les égouts de Paris. Un peu avant (en 1842), Doppler avait découvert l'effet qui porte son nom et qui allait par la suite être appliqué à d'autres domaines ondulatoires. C'est aussi l'époque où l'on cherche à visualiser ce qu'il se passe dans le milieu. C'est Koenig (1832-1901) le premier qui propose en 1862 la *capsule manométrique* : les compressions et décompressions de l'air sont observables grâce à une petite flamme qui s'allonge plus ou moins selon l'état de compression. Le dispositif en coupe est décrit très schématiquement sur la figure II.1-1a) ci-dessous :

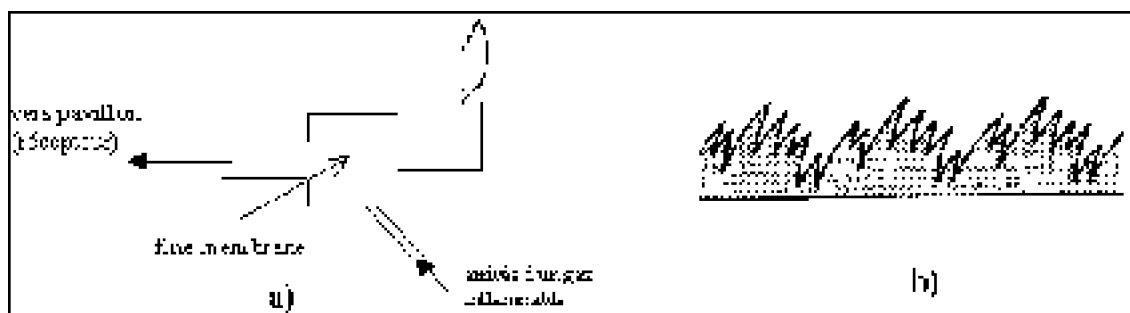


Figure II.1-1 : principe de la capsule manométrique (a) et exemple de résultat obtenu (b)

Adjoint à des miroirs tournants ce système rendait compte au cours du temps de la vibration du milieu à l'endroit où l'on disposait le pavillon (figure II.1-1b)). Cet astucieux système est resté utilisé très longtemps (jusqu'au début du 20^e siècle).

D'un point de vue mathématique, Fourier (1768-1830) publie en 1822 ses travaux sur la "décomposition en série trigonométrique". Applicables à de nombreux domaines, ses résultats sont très vite utilisés pour analyser les vibrations et le lien avec les sons que nous percevons. Helmholtz (1853-1877), de formation physiologiste, exploita les conclusions de Fourier en mettant en particulier en évidence que la hauteur perçue correspond à la fréquence fondamentale. Pour analyser les sons complexes, il met au point les fameux résonateurs qui portent son nom. Citons aussi dans ce domaine les travaux précédents de Savart (1791-1841) et du musicien Rameau (1683-1764) qui contribuèrent au nouvel intérêt pour les perceptions. En guise de conclusion de ce siècle riche en découverte pour l'acoustique, Lord Rayleigh (1842-1919) laisse une synthèse complète de l'état des connaissances de l'époque sur le sujet dans sa *Théorie du son* en 1877 et 1885 (2 tomes).

Au 20^e siècle, avec le développement de l'électricité apparaît une nouvelle sous-discipline, l'électroacoustique, qui allait permettre des progrès considérables dans la maîtrise de la production et de la réception sonore. Le microphone et le haut-parleur apparaissent à la fin du 19^e siècle avec l'invention du téléphone par Bell en 1877.

Ce siècle voit aussi le développement important des recherches sur les relations entre physique et musique. Celles-ci gardent une belle vitalité et ce qu'il est convenu d'appeler aujourd'hui l'acoustique musicale est un domaine très actif (L'IRCAM⁵ a été créé en 1970), notamment du fait de l'usage de l'informatique dans la création et l'analyse des sons. L'informatique musicale est aujourd'hui un domaine de recherche à part entière (pour ne citer qu'un de ses fondateurs, J.-C. Risset a reçu en 1999 la médaille d'or du CNRS). Les recherches en acoustique architecturale connaissent également un essor important dès le début du siècle. Toutes ces avancées s'accompagnent de l'émergence des nouvelles disciplines acoustiques qui se développent au 20^e siècle (cf. § 1.1.2.).

II.1.2 Histoire de l'enseignement de l'acoustique

II.1.2.1 Des débuts révélateurs

Dans l'introduction de son ouvrage *Acoustique et électroacoustique* (1965), Jean-Jacques Matras affirme : **"Il faut dire très honnêtement que l'enseignement classique – surtout en France – réserve une place minime [à l'acoustique], toujours la même depuis bien longtemps (tuyaux sonores, cordes vibrantes, consonance et dissonance, quelques aperçus sur la propagation) qui ne donne aucune idée de son évolution récente et de son degré d'avancement"** (p. 23). Cette constatation a déjà 35 ans, ce qui est relativement peu à l'échelle de l'histoire de l'enseignement de l'acoustique. Nous tentons ici de juger de la pertinence de tels propos en passant rapidement en revue l'histoire de la présence du son dans l'enseignement français, des premières apparitions à aujourd'hui. Nous étudierons essentiellement l'enseignement secondaire d'une part par choix et par référence à notre sujet de recherche, d'autre part sous la contrainte inhérente au système français qui ne dote pas l'université de programmes officiels. Il semble cependant, en tous les cas pour le passé très proche, que l'acoustique soit moins présente à l'université qu'au lycée, tout spécialement si la comparaison est faite par rapport à l'optique (Maurines, 1999)

Avant la Révolution française, "les sciences modernes ne sont pas reconnues comme une partie intégrante de l'enseignement de niveau secondaire" (Belhoste, 1995, p. 22). Il est donc légitime, pour notre étude restreinte, de se limiter à l'enseignement après la Révolution et jusqu'à aujourd'hui. Comme pour l'histoire de l'acoustique, on constate au début de l'Instruction publique (après la Révolution française) un lien assez fort entre acoustique et musique. Tout au moins, la présence de notions d'acoustique dans l'enseignement de la physique est motivée par le désir de faire comprendre la musique. L'enseignement de l'acoustique va tout au long de son existence être influencé par son rapport à la musique. La référence à la discipline "musique" est alternativement passée sous silence ou explicitée, dans un souci de complémentarité, voire de transdisciplinarité

⁵ Institut de Recherche et Coordination Acoustique/ Musique

à la fin du 20^e siècle. Cependant les statuts des deux disciplines ne sont pas identiques vis-à-vis de l'instruction. En effet, la musique peut être considérée comme une discipline à part entière (ce qui ne veut pas dire qu'elle a toujours été enseignée et qu'elle a toujours bénéficiée d'un statut très noble, réservée par exemple en 1836 mais aussi en 1924 aux seules jeunes filles, à côté des arts ménagers) ; par contre, avant l'université, l'acoustique n'est qu'une partie des sciences physiques. Ainsi, cette branche de la physique peut disparaître des contenus d'instructions sans mettre en péril le statut de sa discipline mère. Par contre, la présence ou l'absence de la musique sont révélateurs de choix politiques et en particulier de la place que la société accorde à la formation artistique de ses citoyens.

Certaines notions d'acoustique (en particulier celles relatives aux vibrations des cordes ou aux longueurs des tuyaux sonores) ont pu être enseignées par la discipline "musique" au cours de l'histoire. Nous regardons ici l'acoustique enseignée uniquement dans le cadre d'un contenu de sciences physiques. Nous renvoyons pour plus de détails sur l'histoire des liens entre enseignements de la physique et de la musique au travail déjà cité de Daniel Beaufrils et Marcel-Jean Vilcosqui (1998) et au recueil de textes officiels regroupés par Vilcosqui (1998).

Si l'enseignement des sciences et en particulier des sciences physiques n'est plus vraiment contesté après la Révolution, il faut attendre le 30 novembre 1814 pour voir la première mention de l'acoustique dans des textes officiels. Ce fait historique est suffisamment important pour que nous citions complètement la trace que nous en avons. Le "programme des cours des sciences physiques dans les collèges royaux" (nouveau nom donné aux lycées) précisent pour les élèves de troisième année du cours élémentaire qui suivent la classe de philosophie, dernière année du lycée correspondant à peu près à la Terminale actuelle :

Sixième partie(cité par Belhoste, 1995)

. Acoustique. De la propagation du son dans les corps solides et liquides. De la compressibilité de l'eau, déterminée en comparant son volume dans le vide et sous pression atmosphérique. De la propagation du son dans les gaz et en particulier dans l'air.

. Vitesse du son déduite du calcul et de l'observation. Explication de la différence des résultats.

. Examen des diverses circonstances qui font varier l'intensité du son.

. De la réflexion du son. Des échos. Du porte-voix.

. Lois des vibrations des cordes tendues.

. Comparaison des sons. Moyens d'en exprimer les intervalles. Du tempérament. Des

sons harmoniques. Expérience de Sauveur⁶.

Lois des vibrations des verges et des surfaces élastiques. Expériences de Chladni⁷.

Théories des instruments à vent.

De la distinction des sons simultanés.

Dès 1821 des consignes sont données pour que du matériel d'acoustique soit présent dans les collèges royaux. Cette même année, l'acoustique apparaît dans les programmes du baccalauréat ès sciences pour les futurs étudiants en médecine (**"Dans l'acoustique, les lois générales de la formation et de la propagation du son, soit dans un milieu indéfini, soit dans les tuyaux, avec leur application aux organes de l'ouïe et de la voix"**).

En 1828, l'acoustique apparaît dans les programmes des deux années de philosophie non plus en tant que telle mais pour la première fois à la suite d'une étude des mouvements vibratoires des corps (la partie correspondante s'intitule "Phénomènes physiques produits dans les corps par les forces moléculaires répulsives et attractives"). On y voit pour la première fois mentionnée l'"expérience de la clochette dans le vide". Le programme, très complet, inscrit aussi en deuxième année la relation entre la vitesse du son, "la force élastique, et la densité des corps véhicules du son" et les mesures expérimentales de la vitesse de propagation (avec influence de la température) et des éléments d'acoustique musicale. Ce programme couvre, avec davantage de détails et de formalisme, un domaine d'étude similaire à celui qui est actuellement présent en classe de seconde et que nous détaillerons plus loin.

Il n'est en effet pas nécessaire d'énumérer les fréquents changements de textes officiels pour constater une relative stabilité des contenus d'acoustique (stabilité bien évidemment toute relative si l'on prend en compte la variété des niveaux et des sections). Les deux exemples initiaux ci-dessus rendent compte d'une part du contenu qui va devenir une sorte de "noyau dur" des contenus d'acoustique au cours de l'histoire d'autre part de l'alternance entre l'acoustique pour elle-même et l'acoustique comme exemple, illustration ou domaine d'application des phénomènes vibratoires et/ou oscillants.

II.1.2.2 Un "noyau dur" de savoirs à enseigner

Si l'on peut s'accorder avec J.-J. Matras (1965) sur le fait que par rapport au contenu total de sciences physiques dans l'enseignement, l'acoustique occupe une place assez faible, on doit aussi reconnaître qu'elle est quasiment toujours présente à un niveau ou un autre, au moins dans une section, dans les programmes du secondaire. Sa présence dans les sections littéraires ou à des niveaux inférieurs à celui de la seconde (par exemple en 3^e en 1852 et en 1912 ou en 6^e en 1880) se borne souvent à la *production* et la *propagation du son* (vitesse du son au moins dans l'air avec mesure éventuelle).

⁶ Joseph Sauveur (1653-1716) a travaillé expérimentalement sur différents sujets concernant les sons, mais il semble que l'expérience mentionnée ici fut réalisée en 1700 : elle consistait à déterminer les nœuds et les ventres d'une corde vibrante en utilisant des cavaliers de papier (Taton, 1961).

⁷ Les expériences de Chladni (1756-1827) consistent à observer les figures que dessinent du sable sur des surfaces solides mises en vibration.

autres points pour former ce qui semble être finalement le noyau dur de l'enseignement de l'acoustique :

- Production et propagation du son. Vitesse dans l'air. Mesure.

- Intensité du son, hauteur du son.

- Cordes vibrantes, harmoniques, timbre, gammes et intervalles musicaux.

Ce "noyau dur" est bien évidemment reconstruit ici au regard des différents textes. On trouvera donc, selon les époques, des variations autour des thèmes mentionnés. En particulier, la vitesse de propagation peut être évoquée pour les liquides et les solides. L'étude des tuyaux sonores est également souvent mentionnée à côté des cordes vibrantes.

On remarquera que les concepts de physique tels que *fréquence* et *amplitude* ne sont quasiment jamais cités mais que les textes préfèrent privilégier les qualités des sons perçus *hauteur* et *intensité*. La "mesure du nombre de vibrations" apparaît cependant dans le programme de seconde de 1891. On remarque aussi que les liens historiques entre acoustique et musique laissent leur trace dans ce "noyau dur", puisqu'on y retrouve des notions musicales fondamentales.

La longueur d'onde ne fait son apparition qu'en 1909 (programme de physique de la classe de philosophie) dans une partie "Mouvements périodiques" comprenant une partie d'acoustique. C'est à la même époque que, toujours dans le cadre général des mouvements périodiques et des ondes, l'enseignant doit présenter les phénomènes d'interférences et de résonance.

Enfin, les évolutions technologiques liées aux moyens de production et de réceptions des sons diffusent dans l'enseignement à partir de la rentrée 1982 avec, en Terminale C-E la mention de résonateurs acoustiques et mécaniques, tels le haut-parleur ou le microphone.

II.1.2.3 Domaine propre ou domaine d'application ?

À l'exception du cas de 1828 cité précédemment, c'est plus généralement à partir de la fin du 19^e siècle que les contenus relatifs au son sont assez souvent inclus à une partie sur les mouvements périodiques (ou vibratoires selon l'appellation choisie). C'est par exemple le cas en 1880 (classe de philosophie), en 1912 (philosophie et mathématique), avec, entre-temps un passage par une partie d'acoustique en tant que telle.

A partir de 1959, l'alternance entre domaine propre et domaine d'application s'estompe puisque les phénomènes sonores restent quasiment tout le temps présents au lycée mais comme exemples de parties qui s'intitulent "Mouvements oscillatoires simples", "Phénomènes périodiques" ou encore "Vibrations et propagations". Le son est alors présenté comme un exemple particulier d'onde, avec des propriétés ondulatoires générales et rencontrées dans d'autres domaines (optique, mécanique) mais aussi avec

des propriétés propres (conditions de propagation, propriétés du son - intensité, hauteur, timbre).

Enfin, à la rentrée 1993, le son fait à nouveau son apparition pour lui-même (plus exactement dans une partie qui s'intitule "Sons et ultrasons") avant de disparaître du programme de seconde à la rentrée 2000. Nous détaillons ce contenu d'enseignement un peu plus loin. Mais au regard de l'histoire de l'enseignement de l'acoustique, il est probable que le son apparaîtra dans les programmes de 1^{ère} ou de Terminale à venir (entrant en vigueur respectivement en 2001 et 2002), au moins en tant qu'illustration de phénomènes périodiques ou ondulatoires.

On peut en effet conclure à une certaine pérennité du son dans les contenus de sciences physiques au niveau de l'enseignement secondaire. L'acoustique a ainsi fait la preuve de sa viabilité et de son utilité dans l'enseignement secondaire, tant spécialisé que général, et nous ne voyons pas de raisons objectives pour que la situation change, si l'on veut bien considérer une échelle de temps supérieure à celle des réformes. Il est dans ces conditions tout à fait raisonnable de penser que cet état de fait va se poursuivre et que, quoi qu'il arrive le son, sera prochainement enseigné de nouveau dans les lycées français.

II.2 Enseigner le son

Comme c'est souvent le cas, la description historique qui vient d'être faite permet d'apporter quelques éclairages pertinents sur l'enseignement et l'apprentissage du domaine de la physique qui nous intéresse. Bien loin de reprendre à notre compte l'hypothèse selon laquelle l'apprentissage serait une reproduction plus ou moins fidèle des progrès historiques des idées sur le domaine, cette description historique nous semble utile pour mieux comprendre d'une part ce qui constitue l'objet stable de la physique à enseigner sur ce sujet (le "noyau dur" du paragraphe précédent), d'autre part les processus d'élaboration des contenus d'enseignement à ce sujet et enfin les contraintes qui pèsent sur ces processus. Le point de vue historique est bien évidemment largement insuffisant pour étudier ceci. En plus de cette approche historique et des réflexions du chapitre I, nous utiliserons le cadre théorique de la transposition didactique comme outil d'analyse des processus d'élaboration des savoirs à enseigner envisageables pour un débutant. A partir, entre autre, des liens que la physique entretient au quotidien avec le son, nous proposons donc dans cette partie d'étudier les écarts entre la physique et ce qui est enseigné en cours de sciences physiques et les contraintes qui pèsent sur cet écart et sur le savoir à enseigner lui-même.

II.2.1 De la physique du physicien à la physique à enseigner

Nous avons déjà évoqué dans le chapitre I le désintérêt possible du physicien (étudiant les ondes acoustiques) pour la perception humaine. Nous pouvons dire plus exactement qu'il connaît les liens simplifiés entre signal et perception humaine mais qu'il n'est *a priori* pas forcément amené à s'en servir dans son activité quotidienne (cela dépend de son sujet de recherche). L'interaction onde-matière, le comportement d'une onde acoustique

dans des milieux différents, dans des espaces variés, selon les grandeurs caractéristiques de l'onde constituent davantage ses objets de recherche, l'étude des relations entre signal acoustique et perception étant alors laissé au psychoacousticien. Si on souhaite relier la perception auditive à la fonction d'"acousticien", on peut alors oser une dénomination que le physicien ne réfuterait peut-être pas : le chercheur "physicien" s'intéressant aux ondes acoustiques serait un physicien-faisant-de-l'acoustique alors que l'acousticien aurait le souci de la perception auditive. Ce dernier adopterait ainsi un point de vue plus pratique, au service de l'architecte (acoustique architecturale), de l'urbaniste, voire du musicien (acoustique musicale ou informatique musicale). Cette séparation est bien évidemment forcée ici et il serait dangereux d'oublier les influences mutuelles qui peuvent exister entre les différentes disciplines dans certains cas. Par exemple, certains physiciens puisent leur recherche dans des considérations pratiques liés à l'audition, et les technologies d'isolation acoustique sont souvent, comme dans d'autres domaines, le résultat de recherches plus fondamentales.

Il n'est pas question ici de laisser croire avec la description qui va suivre que la physique porte sur les ondes acoustiques un regard unique et figé. Au contraire, l'éclatement relativement récent des disciplines qui a accompagné le développement de la recherche scientifique dans le domaine a par la même occasion rendu les différentes disciplines des sciences physiques moins cloisonnées. Si bien que les laboratoires dans lesquels des concepts d'acoustique sont de près ou de loin manipulés peuvent avoir des thèmes de recherches très divers ou tentent de mettre en relation des phénomènes physiques qui sont d'habitude séparés (on peut citer par exemple la sonoluminescence (Putterman, 1995)). Nous n'essaierons donc pas ici de définir précisément ce qui caractérise l'acoustique "savante" mais plutôt de donner une idée des concepts couramment manipulés et des méthodes utilisées et de la façon dont ils se transforment une fois dans l'institution scolaire. Pour mener à bien cette entreprise limitée, il peut être pertinent de regarder d'abord l'activité des laboratoires d'acoustique (affichés comme tel) puis d'observer quelques ouvrages de niveau universitaire sur le sujet (là où la distance entre l'acoustique enseignée et l'acoustique savante est la plus faible).

Après avoir évoqué ses sujets d'intérêts, il convient de broser un rapide panorama des outils que le physicien utilise alors. Ce qu'il étudie est le champ acoustique, couplage d'un champ de surpression (suivi spatial et temporel des modifications locales de pression) et d'un champ de vitesse vibratoire dans le ou les milieux étudiés, les conditions de sa création et de son éventuelle interaction avec des discontinuités matérielles. Le champ acoustique est ainsi au son ce que le champ électromagnétique (couplage du champ électrique et du champ magnétique) est à la lumière. Il mesure (et/ou calcule) l'évolution dans l'espace et dans le temps (et la dépendance de ces deux variations) d'une grandeur qui est généralement la surpression ou pression acoustique (différence entre pression en un endroit et la pression de référence qui dépend de la phase de ce milieu). La grandeur suivie, étudiée ou mesurée peut également être selon les recherches, la densité ou la température. En ceci, le physicien se place bien dans le cadre de la mécanique des milieux continus et n'a nul besoin d'adopter un point de vue particulière discontinu puisqu'il est parfaitement capable de décrire précisément les phénomènes en utilisant des grandeurs macroscopiques (dont les variations se font cependant sur des échelles microscopiques). Pour déterminer les champs de variables, le physicien a

recours à un formalisme mathématique ondulatoire qui peut être plus ou moins compliqué mais qui est basé quoi qu'il en soit sur les équations fondamentales qui régissent le comportement du milieu considéré et sur les équations de propagation des ondes (équation d'onde de d'Alembert dans un premier temps). Le formalisme utilisé est importé de l'étude des mouvements vibratoires et oscillants et les concepts de base manipulés alors sont la fréquence et l'amplitude mais aussi les fonctions trigonométriques, l'analyse harmonique des spectres, la résonance (au sens de la physique, non du langage courant). Les outils mathématiques indispensables aux mises en équation et à l'analyse des signaux sont au minimum l'analyse vectorielle et l'analyse de Fourier.

Le formalisme mathématique a permis de rapprocher des phénomènes de nature *a priori* différente mais régis par des équations similaires. Le physicien a alors abondamment recours à des analogies (le plus souvent formelles) qu'il maîtrise. Ceci permet par exemple d'évoquer dans un domaine ondulatoire ou un autre la longueur d'onde, la célérité, la dispersion (dépendance de la vitesse de l'onde avec la fréquence), la notion d'onde stationnaire, d'impédance, les interférences, la diffraction, etc... Certains concepts nés dans une discipline ont même pu être importés de façon fructueuse dans une autre discipline au formalisme analogue (on pensera à la notion électrique d'impédance maintenant largement utilisée sous le même terme en acoustique). Les physiciens ont également pu chercher certains phénomènes observés pour un type d'onde dans un autre domaine. Il n'est pas nécessaire ici d'en dire davantage pour montrer à quel point la physique des ondes a recours à l'outil mathématique et à quel point cet outil peut être fructueux. Nous verrons plus loin que c'est également sur ce point que les contraintes de transposition pèsent le plus.

Le formalisme ondulatoire a contribué, avec d'autres aspects, à faire de l'acoustique une branche de la physique. Ce lien avec la mécanique vibratoire déjà évoqué historiquement (§ II.1.2.3) est suffisant pour trouver dès le niveau universitaire un nombre important d'ouvrages qui traitent par exemple d'une part des vibrations mécaniques, d'autre part d'acoustique (citons par exemple "Vibrations mécaniques, acoustique" de Fleury et Mathieu (1962)). Au niveau du premier cycle universitaire, l'acoustique est souvent traitée dans les livres de mécanique.

Nous finissons en mentionnant également les moyens matériels que l'acoustique physique met en oeuvre et qui, finalement, la caractérisent. Tout en gardant à l'esprit que la simulation numérique et le traitement du signal prennent dans ce domaine une part de plus en plus importante, nous mentionnons ici les appareils classiques du physicien acousticien pour mieux mettre en évidence les différences qui apparaîtront vis-à-vis de l'enseignement. Les capteurs sont bien souvent des capteurs de pression (ou de vitesse). Ils peuvent être extrêmement nombreux, ce qui implique une importante chaîne de traitement de données en aval. Les observations peuvent également se faire par des techniques optiques. Quoi qu'il en soit, on verra peu souvent un microphone (au sens commun du terme) utilisé pour faire des mesures. Des phénomènes physiques tels que la piézoélectricité ont apporté des progrès technologiques considérables à l'acoustique en permettant par exemple de fabriquer des émetteurs très sélectifs et pouvant émettre à haute fréquence. De façon générale, pour traiter électriquement (ou numériquement) des signaux en acoustique, il faut inévitablement utiliser des transducteurs électrodynamiques.

Le matériel utilisé devient donc rapidement extrêmement technique et spécialisé et sa connaissance fait souvent appel à d'autres domaines de la physique. Nous verrons que l'enseignement exploite aussi cette possibilité d'introduction des phénomènes non sonore grâce à un objet technique du domaine acoustique.

Ainsi lorsqu'il s'agit d'enseigner l'acoustique au débutant, quel objet est enseigné ? Le titre de ce paragraphe (*Enseigner le son*) soulève volontairement des questions importantes pour notre sujet. Est-il équivalent d'enseigner l'acoustique et d'enseigner "le son" ? Peut-on en effet faire du son un objet d'enseignement ? Si tel était le cas, de quelle(s) facette(s) s'agirait-il ? Nous avons vu dans le paragraphe II.1.2 que c'est plus souvent le terme acoustique qui figure dans les textes de savoir à enseigner. Les évolutions récentes, et tout particulièrement le programme en cours à ce sujet, semblent davantage parler de sons que d'acoustique, comme si ce qui est à apprendre était moins les sciences *optique* et *acoustique* que les objets "lumières et sons" (programme de la rentrée 1993). Nous tentons dans ce qui suit de comprendre quelle facette du son est traitée par le physicien et avec quels outils, quelle facette du son il peut être utile de comprendre pour tout un chacun et quelles contraintes (sociales et matérielles) pèsent enfin sur l'élaboration des contenus d'enseignement à ce sujet.

II.2.2 Intérêt de l'enseignement de l'acoustique

Dans tout processus de transposition didactique, il est possible d'identifier la prise en compte par la noosphère des intérêts que présente l'apprentissage de tels ou tels savoirs (Chevallard, 1991). Dans le cas de la Physique, nous pouvons identifier trois catégories majeures d'acteurs de la noosphère : la société, les institutions savantes tenantes et garantes du savoir savant, et les institutions scolaires disciplinaires (associations d'enseignants, inspection générale...). Selon le type d'institution impliquée dans le processus de transposition, on peut distinguer différents types d'avantages mis en avant pour justifier la présence institutionnelle de l'objet d'enseignement à l'école. Nous distinguons en particulier deux types d'avantages en ce qui concerne le son. Dans un premier temps nous verrons ceux qui seraient mis plutôt en avant par l'institution "société" qui vise à former ce qu'elle définit comme un bon citoyen. Dans un second temps nous donnerons des éléments qui permettent de légitimer l'enseignement par rapport à la sphère savante ou par rapport aux institutions scolaires disciplinaires.

Nous dressons ci-après un panorama, qui n'a pas la prétention d'être complet, des avantages qui peuvent être avancés *a priori* pour un éventuel enseignement *de physique* en acoustique pour débutants. Il s'agit bien là de se placer dans le cadre de l'enseignement de la physique et le chapitre I a permis de montrer que la référence à la physique doit être précisée car l'acoustique du physicien n'est pas du tout la même que l'acoustique de l'architecte. Il est important de noter que les arguments cités ne constituent pas des avantages de *notre* point de vue mais plutôt les arguments avancés par l'une ou l'autre des catégories de la noosphère pour l'enseignement d'un tel sujet. Enfin, nous ne faisons pas strictement référence, dans ce paragraphe, au contenu présent actuellement dans les lycées.

II.2.2.1 Un phénomène commun

Il n'est pas nécessaire de s'attacher à montrer que les phénomènes sonores sont communs. Ce caractère évident de l'environnement sonore ne doit pas pour autant être mis entre parenthèse dans notre travail. Nous verrons en particulier comment ces "évidences sonores", ces faits bruts (Guillaud, 1998) peuvent influencer le traitement des situations sonores proposées à l'étude dans un contexte d'apprentissage. On a décrit sommairement quels aspects de la notion de *son* la physique s'approprie pour en faire un concept scientifique. On a vu en particulier que les situations d'étude de la physique peuvent alors considérablement s'éloigner du quotidien sonore, fait de bruits urbains, de musique ou encore de paroles. Cependant, il est indéniable que s'intéresser au son, du point de vue de la physique, c'est aussi essayer de comprendre les mécanismes sonores de l'environnement humain. La physique a donc là un moyen pas si fréquent de fournir des outils pour interpréter, décrire et mieux comprendre un champ empirique largement partagé. Le sujet peut donc être relativement facilement légitimé par rapport à la société même si cette familiarité des phénomènes sonores ne suffit pas pour ceci. L'Union des Physiciens, qui a par nature des soucis didactiques, puisqu'elle est une association d'enseignants de la discipline, ne se prive pas de mentionner cet aspect du son pour justifier la présence d'un tel sujet dans l'enseignement général (Velay, 1994).

Cette familiarité avec les phénomènes étudiés peut aussi devenir une arme de séduction pour la discipline. La motivation des élèves peut dans certains cas être obtenue en leur proposant l'étude de phénomènes qui leur paraissent quotidiens (ou qui implique des objets quotidiens, voir plus loin). Sans dévoiler davantage le programme actuel sur ce sujet, nous pouvons constater que ce fut un argument de la noosphère pour présenter ce sujet dans les programmes de seconde de 1993 et que les élèves, d'après les enseignants, paraissent effectivement intéressés (Lestrade et al., 1996).

Brian Foley (1995), avant d'élaborer un contenu d'enseignement, a demandé à ses élèves les sujets dont ils aimeraient traiter en relation avec le son. Les sujets évoqués sont essentiellement la musique, les instruments, les problèmes d'isolation phonique, d'échos et de réverbération. Il n'y a pas de raison que les intérêts des élèves soient très différents en France.

Nous allons voir dans ce qui suit ce que la société occidentale d'une part peut reconnaître comme un savoir utile mais aussi en quoi la science et la physique scolaires, d'autre part, peuvent voir un intérêt à l'apprentissage de savoirs de ce domaine.

II.2.2.2 Une sensibilisation aux nuisances sonores

Les nuisances sonores sont les nuisances principales ressenties par les Français, particulièrement en ville (d'après une enquête de l'INSEE de janvier 1996 citée par Baudot (1998), qui révèle en particulier que 40% des français et 56% des parisiens sont gênés par le bruit). Il s'agit donc bien d'un problème majeur pris en charge par les pouvoirs publics et en particulier par le Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire (cf. *discours de clôture des assises de l'environnement sonore* prononcé le 17 décembre 1998 par la ministre concernée, D. Voynet). La difficulté de résorption de ces nuisances tient d'une part à la variété des situations (bruit routier, aérien, ferroviaire, bruit de voisinage, bruit de lieux musicaux...), d'autre part au caractère souvent privé des

situations dans lesquelles les pouvoirs publics peuvent dans certains cas difficilement intervenir. Il paraît donc essentiel d'informer (et de former) le citoyen qui est et sera toujours d'une part générateur de bruit, d'autre part exposé au bruit. Il faut donc dans un premier temps responsabiliser en donnant les moyens de comprendre pourquoi il y a gêne pour autrui et comment la diminuer à la source, et dans un second temps donner les moyens pour envisager de se protéger soi-même des nuisances. Il en va d'une meilleure gestion de l'environnement mais également de la capacité à choisir ou critiquer des dispositifs d'isolation phonique par exemple.

Enfin, il ne faut pas négliger la formation d'ordre sanitaire au sujet des atteintes physiologiques ou psychologiques que peuvent causer les bruits trop forts (concerts, casque fournissant des signaux de haut niveau...). Sensibiliser aux risques encourus, exercer une certaine vigilance à ce sujet (y compris en milieu professionnel), envisager les remédiations appropriées peuvent être considérés comme essentiels à la formation du citoyen.

Pour ces raisons, enseigner l'acoustique en classe de physique peut se justifier. Mais les savoirs en jeu sont très éloignés de ceux de la physique savante sur le sujet. Par exemple, on sait maintenant que les mesures en décibels, aussi précises qu'elles soient, ne suffisent pas à rendre compte de la quantification des gênes⁸. Il est facile d'imaginer que certains des savoirs en jeu soient revendiqués par d'autres disciplines (en particulier les sciences de la vie et de la terre pour les aspects sanitaires ou l'éducation civique pour les aspects légaux sur les nuisances). Si la société peut donc légitimement considérer que ces savoirs doivent être possédés par tout citoyen, la responsabilité de leur enseignement ne revient pas de droit à la physique scolaire, comme c'est cependant le cas actuellement, au prix d'un écart supplémentaire par rapport au savoir savant.

II.2.2.3 L'occasion de réfléchir sur les perceptions humaines des événements

Il est souvent mentionné dans les textes officiels qui introduisent les réformes des programmes ou les programmes eux-mêmes qu'il faut donner à l'élève les moyens de réfléchir par lui-même, d'avoir une analyse critique de ce qu'il observe. Le "son" peut alors constituer une occasion intéressante pour y contribuer. Il peut ainsi être formateur d'articuler les perceptions individuelles (récoltées éventuellement par différents canaux sensitifs), avec la subjectivité qui leur est inhérente, et les interprétations qu'en donne une science dite exacte comme la physique. C'est alors l'occasion d'étudier les inévitables limites de ce type d'interprétations ou de descriptions. Encore faut-il que la physique scolaire accepte de présenter un savoir scolaire qui mette en jeu des perceptions individuelles régulièrement en porte-à-faux avec le savoir objectif qu'elle est censée présenter (cf. chapitre I). On voit là un exemple intéressant de concurrence qui peut s'exercer entre deux institutions différentes dans l'élaboration d'un contenu d'enseignement : la société en général plaide pour ce type d'activité alors que la physique (savante mais aussi scolaire) ne les perçoit que comme une cause d'éloignement du savoir de référence.

⁸ Il est maintenant absolument nécessaire de prendre en compte les ambiances et environnements sonores.

II.2.2.4 Un domaine de la physique qui permet de s'ouvrir à d'autres disciplines (interdisciplinarité)

Une autre contrainte sociale actuelle est la demande d'interdisciplinarité à l'école. Cette tendance au décloisonnement des disciplines traditionnelles peut se faire de différentes façons mais reste difficile (pratiques nouvelles, nécessaire décontextualisation des savoirs, sujets à trouver...). Le son constitue un objet propice à ce type de pratique puisque qu'il peut faire intervenir des disciplines diverses : science de la vie (sur rôle de l'oreille et du cerveau), musique mais aussi technologie. Ce peut être aussi l'occasion de parler de notions de psychologie ou encore de la nécessité de lois juridiques sur le sujet (et pour ceci de mesures légales).

Les deux points suivants résultent moins de la demande de la société (former le citoyen) mais sont plutôt impulsés par l'institution détentrice du savoir de référence. Il s'agit alors davantage de contribuer à former un scientifique, ce terme étant pris au sens que la société savante lui attribue.

II.2.2.5 Un moyen d'illustrer l'imbrication moderne technologie-physique

Nous avons déjà évoqué les liens historiques importants entre l'acoustique et les instruments de musique, pendant longtemps sources principales des recherches. Ces liens se sont par la suite assez largement distendus, au fur et à mesure que l'objectivité du physicien ne suffisait plus à expliquer les perceptions humaines. Paradoxalement, les écarts entre les deux disciplines sont devenus encore plus importants lorsque les moyens technologiques de mesure (en particulier électriques) sont apparus (Leipp, 1989). La technologie a pris une place de plus en plus grande en acoustique (au fur et à mesure la musique intéressait de moins en moins les acousticiens) mais aussi dans la vie quotidienne "sonore". Tout individu du monde occidental utilise maintenant quasiment quotidiennement des haut-parleurs ou des disques, et l'utilisation du microphone est devenue naturelle. Il semble même que cette évolution technologique s'apprête à connaître un second souffle avec l'arrivée dans les foyers de la synthèse et de l'analyse numérique (les "home-studios"). Il n'est pas question dans cette section de mettre en doute l'appartenance de ces objets technologiques à un champ empirique de référence sonore. Il n'est pas contestable, cependant, que ces objets sont presque toujours impliqués dans les phénomènes sonores (et pas seulement dans la vie quotidienne). Le physicien utilise ces outils techniques mais contribue aussi par la manipulation du savoir savant de la discipline à les améliorer. L'acoustique apparaît ainsi, parmi tous les champs de savoir des sciences physiques, comme un bon exemple d'imbrication des savoirs théoriques et des technologies, si tant est qu'on puisse toujours les séparer nettement. De plus, les évolutions en acoustique sont un moyen d'illustrer le fait que la théorie ne précède pas systématiquement la technique. De nombreux développements théoriques ont été rendus possibles, dans le domaine de l'acoustique peut-être plus que dans d'autres, grâce à l'apparition de nouvelles technologies. Les appareils technologiques précèdent parfois ou suivent au moins de très près les avancées théoriques. Il semble bien que ce soit une particularité du fonctionnement de la science moderne (Rosmorduc, 1996).

Cet aspect des choses est également le moyen d'illustrer les écarts importants qui peuvent exister entre une idée théorique et son application pratique soumise à des contraintes de nature bien différente (facilité d'utilisation, erreur humaine, dissipation énergétique par exemple). Il y a dans ce passage intervention de nombreux savoir-faire et compétences spécifiques ; l'observation de la constitution d'objets pourtant "simples" (ou perçus comme tels) comme un haut-parleur ou un microphone peut être à ce sujet tout à fait judicieuse.

On voit bien ainsi comment la physique savante peut plaider pour ce type de présentation de la physique qui montre une science ancrée dans le quotidien et avec un lien fort avec des objets de tous les jours. Cependant, la physique scolaire, pour être légitimée, doit trouver un équilibre difficile entre une science "quotidienne" qui ferait la part trop belle aux applications technologiques et une science théorique (plus proche de celle qui se pratique) davantage tournée vers la manipulation de concepts, éventuellement au moyen d'expériences construites et plus éloignée de la vie quotidienne.

II.2.2.6 Des phénomènes et des notions transversales

Les liens privilégiés que l'acoustique entretient avec le domaine plus large de la mécanique, que nous avons mentionnés en particulier du point de vue historique, ne sont pas anodins pour ce qui concerne l'enseignement. En effet, les notions fondamentales qui permettent de décrire et d'interpréter les phénomènes sonores sont également présentes dans d'autres domaines de la physique. Des sous-disciplines (au sens où elles ne sont pas enseignées en tant que telle au niveau secondaire) comme la mécanique élémentaire ou la mécanique vibratoire peuvent par exemple partager un domaine conceptuel avec l'acoustique (notion de vibration, de fréquence, de phase, etc...). Lorsque la complexité de l'utilisation des concepts augmente, les disciplines concernées peuvent être différentes et plus spécialisées : en mécanique des fluides ou physique des ondes par exemple.

On peut tenter de dresser ci-après le tableau II.2-1 qui résume les branches de la physique qui sont concernées par des notions ou des phénomènes non réservés à l'acoustique et que l'acoustique peut présenter ou importer selon l'ordre d'apparition dans les différentes phases d'enseignement. Nous avons regroupé les notions selon qu'elles concernent plutôt la mécanique vibratoire (ce qui permet schématiquement de décrire un émetteur sonore ou les vibrations de l'air) ou plutôt la mécanique ondulatoire (ce qui permet de décrire les perturbations du milieu de propagation) en ayant bien conscience que ces deux catégories ne sont pas disjointes.

Tableau II.2-1 : concepts et phénomènes utilisés dans d'autres domaines de la physique que l'acoustique.

notions et phénomènes	
Vibration	mouvements vibratoires ; oscillations ; signaux variables
Fréquence, période	
Amplitude	
Résonance	
Spectre	
Propagation	physique ondulatoire
Vitesse de propagation (et technique de mesure)	
Longueur d'onde	
Transfert d'information sans déplacement de matière	
Milieu de propagation	
Effet Doppler	
Réflexion	
Diffraction	
Interférence	
Absorption	
Impédance	
Puissance	
Énergie	
	domaine de référence trop large pour être spécifié

Cette liste ne se veut pas exhaustive. Nous n'avons pas mentionné, en particulier, les notions telle que l'"intensité" qui peuvent être utilisées en acoustique (intensité sonore ou acoustique) mais aussi dans d'autres domaines avec des sens largement différents (intensité électrique ou intensité lumineuse par exemple). On peut également citer la notion d'impédance.

Les connaissances impliquant ces concepts, approchées pour la première fois au cours d'un enseignement d'acoustique, peuvent donc être réexploitées avantageusement (au prix de quelques précautions dans la phase de transfert à un autre domaine). Lorsque les concepts en jeu ont fonctionné dans au moins deux domaines, l'hypothèse selon laquelle le contexte acoustique contribue alors à donner du sens et à épaissir les concepts en jeu devient une hypothèse envisageable.

II.2.2.7 Une occasion d'introduire des méthodes et des connaissances externes

Enfin, et toujours du point de vue du savoir savant de référence, l'enseignement de l'acoustique peut constituer un bon alibi pour :

mettre en oeuvre des techniques d'observation qui peuvent être exploitées transversalement mais qui ne sont pas à proprement parler dans le champ de l'acoustique : observation de signaux électriques évoluant rapidement dans le temps, analyse de mouvements rapides par stroboscopie, acquisition et traitement de données,

analyse harmonique ;

évoquer des phénomènes physiques fondamentaux impliqués dans le fonctionnement de certains appareils utilisés en acoustique : force de Laplace et induction électromagnétique pour haut-parleur et microphone, piézoélectricité, ou de façon plus générale toutes les techniques de transduction.

Il est par exemple facile de vérifier ceci en parcourant les ouvrages scolaires des 20 ou 30 dernières années (parce que les objets techniques y occupent une part de plus en plus importante) sur le sujet ou encore en relevant quelques sujets abordés dans un Bulletin de l'Union des physiciens⁹ consacré entièrement "au son", les guillemets étant ici pour signaler que le bulletin en question s'intitule effectivement "Le son" (n° 761, 88^e année, février 1994) :

Mise en oeuvre pratique de l'analyse spectrale numérique (C. Cance)

Décodage d'un clavier téléphonique à numérotation à fréquences vocales par analyse spectrale numérique (C. Cance et G. Lefèvre)

Relation entre le mouvement de la membrane d'un haut-parleur et la tension aux bornes d'un microphone (R. Allard)

Modélisation du haut-parleur électrodynamique (G. Catroux)

Principe du vélocimètre sanguin à effet Doppler (R. Mélin)

On peut raisonnablement estimer que la publication d'une institution comme l'UdP donne une bonne idée du savoir disciplinaire qui vit dans la communauté des enseignants ou des chercheurs de la discipline. Nous n'avons mentionné ici que quelques exemples parmi les nombreux articles de ce numéro mais ceux-ci nous paraissent révélateurs de l'intérêt que trouve cette communauté à traiter du son en général et des activités qui sont proposées en conséquence.

Nous avons exploré dans ce paragraphe II.2.2 les contraintes pesant sur le processus de transposition de l'acoustique issues d'une part de la demande sociale d'autre part de l'institution représentant le savoir savant. L'étude du passage d'un savoir savant à un savoir à enseigner serait bien évidemment incomplète si l'on ne s'intéressait pas aux contraintes liées à l'institution scolaire.

II.2.3 Quelles contraintes institutionnelles pour le savoir à enseigner au sujet

⁹ Nous adopterons dorénavant les acronymes classiques UdP pour Union des Physiciens et BUP pour Bulletin de l'Union des Physiciens.

du son ?

On peut distinguer deux types de contraintes imposées par l'institution scolaire. Elles pèsent toutes, en proportion plus ou moins importante sur les processus de transposition d'une part entre savoir savant et savoir à enseigner (transposition à laquelle on réserve généralement l'adjectif didactique), d'autre part entre savoir à enseigner et savoir enseigné.

Les contraintes d'ordre fonctionnel et social (temps et rythme scolaires, importance du groupe, statut des sciences physiques dans l'institution scolaire, nécessité d'évaluation, insertion d'un contenu dans un programme de formation pluriannuel cohérent), les deux aspects étant parfois imbriqués, sont relativement stables et normalisées d'un lieu d'enseignement à un autre, à l'échelle d'un pays comme la France, où l'institution scolaire est sous tutelle Nationale.

Les contraintes d'ordre matériel (moyens disponibles pour les activités expérimentales, effets de mode concernant le matériel utilisé, utilisation du livre scolaire) sont extrêmement diverses et dépendent assez facilement du contexte, en tous les cas du niveau auquel on se place. Pour cette raison, nous ne considérons à partir de maintenant que l'institution scolaire correspondant au cycle secondaire (collège et lycée) de l'enseignement français, sans évoquer le niveau universitaire (sauf en guise de remarque comparative).

Nous n'allons pas développer toutes ces contraintes mais nous ne retenons que celles qui nous paraissent particulièrement pertinentes pour le sujet qui nous intéresse et nous analysons les conséquences induites inévitablement par de telles contraintes. Nous envisagerons successivement les contraintes dues :

- . au choix d'un enseignement introductif ou élémentaire au sujet du son (ce à quoi nous nous restreignons) ;
- . au matériel disponible et utilisable ;
- . à la nécessité d'évaluer ;
- . au nécessaire suivi disciplinaire.

II.2.3.1 Contraintes d'un enseignement introductif sur les outils de description et de représentation (iconographiques et langagiers)

Il est bien évident qu'une bonne partie des contraintes liées au fait que l'apprenant est novice sur le sujet sont elles-mêmes sous-tendues par les hypothèses d'apprentissages qu'adopte plus ou moins explicitement l'institution scolaire et qui pèsent elles aussi sur les processus de transposition. Nous ne détaillerons pas dans ce paragraphe l'analyse de

ces hypothèses d'apprentissages, auxquelles nous consacrerons une partie ultérieure (chapitre IV en particulier). Selon les besoins de la discussion nous pourrions cependant mentionner la ou les hypothèses sous-jacentes à tel ou tel aspect du fonctionnement scolaire.

Le novice dispose d'abord de ses sens pour apprendre ce qu'est un son, pour comprendre comment cette sensation est corrélée à des phénomènes physiques, à des objets physiques ou encore comment l'objet physique "son" se comporte, se crée et se capte. L'ouïe, bien évidemment, va jouer un rôle essentiel et indispensable. Cependant, l'écoute en groupe n'est pas toujours aisée. Elle induit inévitablement des variations individuelles perceptives fortes du fait de la subjectivité inhérente aux perceptions auditives mais également à cause de la position spatiale spécifique de chaque élève par rapport à l'émetteur. Même dans des conditions d'écoute optimales, cette activité est insuffisante pour expliquer et interpréter les phénomènes mis en jeu. Nous avons déjà dit au chapitre I combien il était difficile d'étudier une perception auditive le plus souvent éphémère, changeante, dont on peut difficilement garder une mémoire. Pour mener à bien les études nécessaires à la corrélation entre des phénomènes descriptibles objectivement et des perceptions plus subjectives, il est alors naturel de chercher d'autres modes de description et de représentation.

Les concepts de la physique sont alors évidemment très utiles pour la description des phénomènes. Comme nous l'avons vu, lorsqu'ils sont impliqués dans un formalisme mathématique ondulatoire, ils sont suffisants au physicien pour décrire les phénomènes physiques qu'il étudie. Ceci ne l'affranchira pas des mesures éventuellement nécessaires mais la description formelle à l'aide de grandeurs physiques parfaitement définies suffit pour que la communauté savante communique et progresse.

La situation est très différente lorsqu'un apprenant doit décrire et interpréter des phénomènes sonores. D'une part, les concepts et grandeurs physiques utilisés sont à définir avant qu'il puisse s'en servir comme outils. D'autre part, il est rare (surtout depuis quelques années) qu'un élève du secondaire ait des connaissances suffisantes en mathématiques pour pouvoir utiliser le formalisme mathématique et la notion de champ spatio-temporel (quant bien même il saurait le faire, nous avons de bonnes raisons de penser que cette manipulation mathématique ne favoriserait pas forcément la compréhension des concepts manipulés et des phénomènes). Nous prendrons donc ces deux points (nécessité d'une compréhension préalable des concepts et inaccessibilité du formalisme mathématique ondulatoire) comme contraintes importantes pesant sur la détermination du savoir à enseigner.

La description en terme de grandeurs physique doit donc être visée. Elle sera utile à la description du comportement de la source de son (*fréquence, amplitude* en particulier) mais également à la description de l'onde sonore (*vitesse, longueur d'onde* par exemple). Les mathématiques interviendront relativement peu si le choix est fait de ne pas aborder le formalisme ondulatoire. Ces grandeurs pourront néanmoins être mises en relation quand cela sera possible et pourront également donner lieu à des représentations iconographiques (schémas, images, graphe...). La manipulation de ces grandeurs, dont la représentation graphique n'est qu'une modalité, ne prend néanmoins sens que lorsque la signification des grandeurs elles-mêmes est assurée. Finalement (mais antérieurement

dans le processus d'enseignement), il convient de donner à l'apprenant les moyens de comprendre ce que signifient ces grandeurs (ou les concepts) qui servent à décrire et interpréter les phénomènes.

Pour ce faire, il est alors naturel d'utiliser des supports visuels, en particulier iconographiques. L'observation visuelle des phénomènes eux-mêmes est rarement possible, en particulier du fait de leur rapidité que la persistance rétinienne empêche de visualiser et à cause de la grande difficulté d'observation des modifications du milieu de propagation. L'apprenant peut seulement dans certaines situations observer visuellement des manifestations indirectes de la présence d'un son.

La nécessité de "rendre le son visible" (sans oublier quand c'est possible de rendre le son "touchable") pour pouvoir mieux appréhender ce qu'est le son "objectif" (cf. chapitre I) devient alors un problème majeur posé à l'enseignement..

Les représentations schématiques apparaissent alors comme des moyens utiles de donner une description visuelle *compréhensible* des concepts ou des phénomènes. Ce qui est visé, c'est la perception de tel ou tel phénomène ou de tel ou tel aspect du son à travers les représentations sémiotiques diverses. Les représentations visuelles de l'amplitude d'une vibration ou encore de l'état "microscopique" d'un milieu traversé par une onde sonore (qui permet entre autre de "matérialiser" la longueur d'onde) contribuent par exemple à représenter certains aspects de ce qui est perçu ou de ce qui se passe dans le milieu.

On sent poindre aussi à ce sujet le besoin d'images animées, en particulier d'animations ralenties pour suivre ce qui se passe (Foley, 1995 ; Robles, 1997). Si certaines images fixes sont facilement réalisables à l'école (ne serait-ce qu'au tableau), d'autres restent difficiles soit à obtenir soit à présenter aux élèves. De plus, présenter pour des besoins pédagogiques des images animées n'est pas encore une pratique très répandue en sciences physiques. Dans ces domaines, des progrès se sont faits (en particulier avec l'arrivée des "techniques audio-visuelles") et se font encore sentir. On peut penser que les nouvelles technologies vont bientôt permettre la généralisation des ces pratiques dans l'enseignement (Beaufils et al., 1997).

Par ailleurs, la physique a l'habitude de représenter une oscillation ou vibration au cours du temps, ce qui conduit ici à des représentations graphiques des vibrations sonores. Ce qui est représenté est généralement l'évolution de la vibration en un endroit donné au cours du temps (signal qui peut donner lieu à une analyse harmonique). Cette représentation tend à être présente dans la vie courante, sous forme iconique (pour symboliser un son, on dessine un petit signal du type IMAG01) ou sous forme plus sophistiquée dans les logiciels de création sonore pour le grand public. C'est aussi ce type de courbe qu'on obtient lorsqu'on branche un microphone à un oscilloscope, sans précision explicite cette fois que le signal est donné en fonction du temps (figure II.2-1ci-dessous).

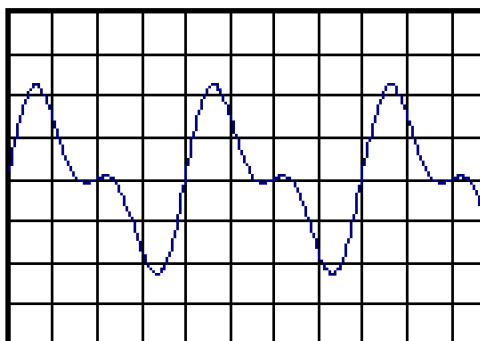


Figure II.2-1 : exemple de signal visualisé à l'oscilloscope à l'aide d'un microphone

Le spécialiste peut donc facilement se surprendre à dire qu'il "voit le son" ! La perception auditive n'est souvent plus nécessaire de son point de vue. Pour "rendre le son visible", on a donc coutume d'utiliser des schémas ou des courbes, souvent sans entendre les sons correspondants. Quand, malgré tout, on essaie d'entendre et de voir en même temps, on a alors recours à des technologies (microphones, appareils électriques, appareils de mesure...) qui ne facilitent pas forcément la compréhension des phénomènes puisqu'elles sont elles-mêmes complexes dans la mesure ou comprendre leur fonctionnement implique de comprendre les concepts physiques en jeu.

Signalons également les possibilités de représentations de la propagation des ondes (sonores ou lumineuses). On peut les classer en deux grandes catégories issues des représentations utilisées dans les manuels de physique, représentées de façon typique sur la figure II.2-2 ci-dessous, et consistant à représenter les rayons (direction de propagation de l'énergie) ou les surfaces d'onde :

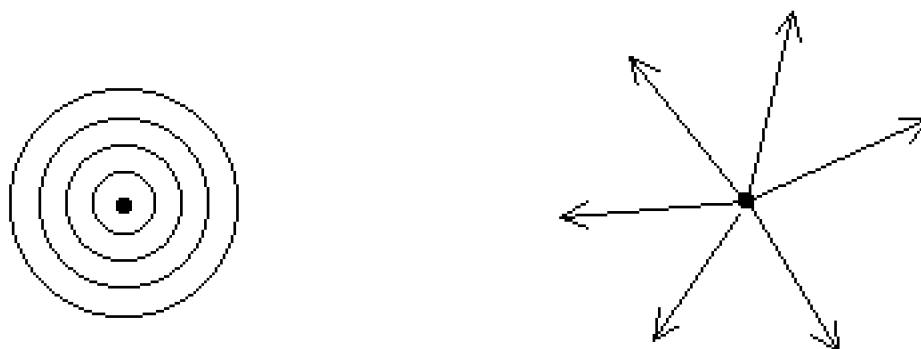


Figure II.2-2 : représentations typiques de la propagation d'une onde (rayons à droite, surfaces d'onde à gauche)

On trouvera une étude détaillée de l'utilisation par des élèves du secondaire et de l'université et de la présence de ces schémas dans les livres scolaires et de vulgarisation dans l'important travail de L. Maurines qui les replace dans une problématique plus large (Maurines, 1999). Ces représentations sont largement utilisées dans la vie quotidienne sous des formes plus ou moins variées, par exemple comme représentation iconique (IMAG02) ou dans des schémas un peu plus sophistiqués (figure II.2-3) mélangeant parfois plusieurs types de représentations (la figure de gauche ci-dessous emprunte à la

surface d'onde et à une représentation microscopique). Elles sont donc disponibles pour le novice et induisent bien évidemment des idées plus profondes sur la nature de la propagation en jeu.

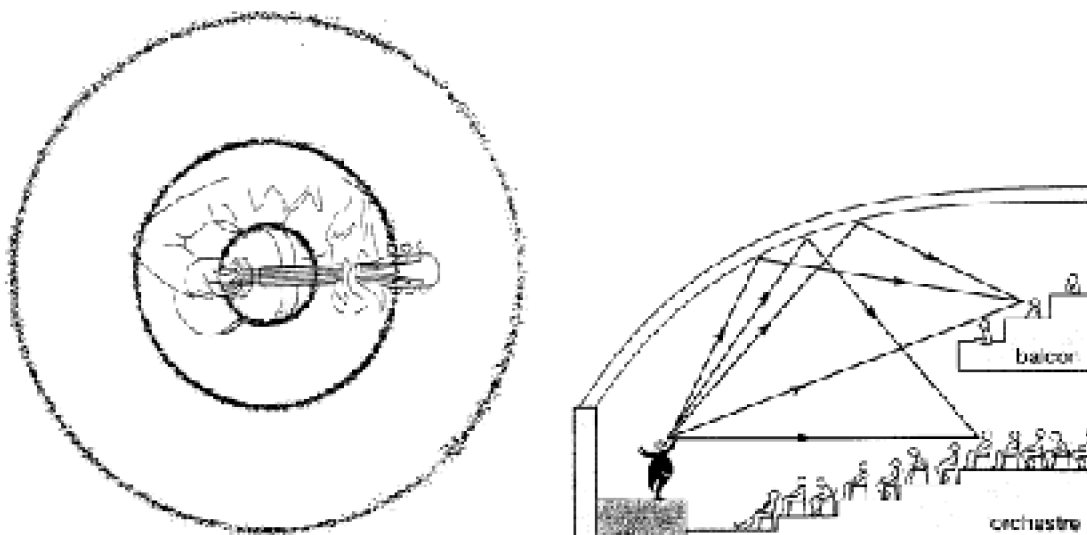


figure 11.2-3 : figures utilisant les représentations en surfaces d'onde ou en rayons (figures issues de Pierce J.R., 1984, p. 27 (à gauche), du manuel de seconde Tomasino & Pénigaud, 1993, p. 167(à droite))

Dans le domaine de l'acoustique musicale coexistent les représentations qui sont plutôt celles du musicien (la partition essentiellement) et celles qu'utilisent plutôt le physicien (forme d'onde, spectre issu de l'analyse de par transformée de Fourier mais également sonagramme). Ces représentations ne sont plus maintenant cloisonnées et sous l'impulsion de l'informatique musicale, il est de plus en plus courant de voir des musiciens manipuler des spectres ou des sonagrammes. Quelle que soit la représentation adoptée, on se heurte à la difficulté de représenter la diversité des paramètres sonores dans un espace réduit et avec une symbolique qui peut facilement prendre sens. L'objectif est de pouvoir s'approcher le plus possible d'une bijection entre ce qui est perçu et ce qui est représenté (Raquillet, 1987). Les inconvénients de telle ou telle représentation ont été largement étudiés. Les objectifs de la représentation et la nature de ce qui doit être représenté permettent de faire un choix de la représentation la plus adaptée. Par exemple, la phase n'étant pas perçue, il ne sert *a priori* à rien de la représenter¹⁰. Nous conviendrons par exemple avec Beaufile et Le Touzé (1998) que c'est le sonagramme, objet absent des contenus d'enseignement officiels jusqu'à maintenant, qui est le plus efficace pour décrire et comparer les sons et qui s'approche le plus de la bijection visée. Il nécessite cependant, pour être utilisable, des connaissances théoriques relativement importantes, en particulier au sujet de la compréhension et de la signification du spectre puisqu'il en est une représentation au cours du temps. Comme les sujets dont nous

¹⁰ Raquillet (1987) propose à cet effet une représentation, le *cyclogramme*, qui ne prend pas en compte la phase mais qui permet de représenter la forme d'onde. Le principe est basé sur une construction de Fresnel. Malheureusement cette représentation ne permet pas de distinguer deux sons de hauteurs différentes.

traiterons par la suite ne concerne pas l'acoustique musicale, nous n'aurons nul besoin de représentations spectrales ou par sonagramme.

L'utilisation de toute représentation sémiotique du son implique donc de façon sous-jacente des connaissances, des liens entre objets du monde perceptifs et objets (conceptuels) de description de la physique. Pour évidents qu'ils puissent paraître au physicien, ces liens sont à construire pour l'élève, avec les moyens disponibles intellectuellement et matériellement. Les investigations que nous avons pu mener à ce sujet montrent que ces liens ne sont évidents ni à construire ni à utiliser pour décrire et/ou prédire. Nous reviendrons par la suite, dans des contextes plus précis, sur l'importance des représentations sémiotiques (partie D en particulier).

Enfin, on peut signaler que la visée d'un savoir partagé par tous en fin d'enseignement (le plus proche possible du savoir à enseigner) induit une certaine normalisation du vocabulaire de description utilisé. Certains mots peuvent ainsi devenir autorisés alors que d'autres sont rejetés. La richesse et la variété de description permises par la langue française pourraient être bridées (ou leur développement empêché). Si cette étape paraît raisonnablement indispensable dans une première phase d'apprentissage de la physique des phénomènes sonores, il nous paraîtrait dommage de ne pas revenir dans un second temps à une analyse critique des descripteurs de la physique à la lumière des termes que peuvent avoir envie d'utiliser spontanément les apprenants.

II.2.3.2 Contraintes matérielles

Nous ne revenons pas ici sur les difficultés traditionnelles rencontrées pour présenter des animations dans des séquences d'enseignement. Il s'agit juste pour nous dans ce paragraphe de prendre en compte le matériel d'acoustique présent dans les institutions scolaires (et les différences ou similitudes qui peuvent éventuellement exister avec le matériel utilisé par le physicien faisant de l'acoustique). Cet aspect des choses vient bien sûr en aval des savoirs qui vivent dans les différentes niches. Par exemple, le physicien utilise abondamment l'analyse de Fourier et utilise pour ceci des outils informatiques de plus en plus puissants. A l'école, en revanche, l'ordinateur n'est pas pour l'acoustique l'instrument essentiel (même s'il est normalement et de plus en plus utilisé). Il sera davantage fait appel à un oscilloscope, plus portable, qui permet d'observer des signaux au cours du temps. De façon générale, les capteurs et les moyens de mesure peuvent être très différents d'une institution à l'autre. Le physicien utilise des capteurs de pression (parfois en nombre important pour avoir une "image" du champ de pression avec une résolution optimale), alors que l'objet récepteur le plus commun pour le savoir à enseigner est le microphone qui n'est pas toujours un capteur de pression, et qui, quoi qu'il en soit est souvent utilisé seul.

Le milieu étudié est prioritairement l'air, pour des raisons évidentes de réalisations pratiques des expériences en classe. Ceci n'exclut pas les expériences avec un autre milieu de propagation lorsque celui-ci est l'objet de l'expérience.

Signalons également comme contrainte liée à l'organisation matériel de l'enseignement la possibilité souhaitable d'expériences réalisées dans une même pièce par plusieurs élèves (travail à deux ou en petit groupe), ce qui n'est pas sans poser

problème puisque l'écoute ou les mesures sont "polluées" ou perturbées par les voisins. L'enseignement prend alors pour habitude d'utiliser des émetteurs et récepteurs ultrasonores (il suffit pour se convaincre de cela d'observer la collection de laboratoire de physique de n'importe quel lycée français ou de feuilleter un catalogue de matériel pédagogique, pas forcément récent). Il n'y a plus d'écoute possible (!) mais la "pollution" disparaît aussi. De plus les ultrasons permettent de faire de l'acoustique géométrique dans des conditions correctes puisque les faisceaux sont dès lors plus directifs que dans le cas des sons. On peut voir cette présence des ultrasons dans l'enseignement au sujet du son comme un effet de légitimation vis-à-vis du savoir savant qui minimise lui la différence entre sons et ultrasons.

II.2.3.3 Contraintes d'évaluation

La contrainte que fait peser la demande d'évaluation de l'institution scolaire sur l'enseignement et l'apprentissage n'est plus à démontrer. L'enseignement de l'acoustique non seulement ne déroge pas à la règle mais peut même être, dans certains contextes et davantage que d'autres domaines des sciences physiques, modelé de façon déterminante par cette contrainte.

Il n'est pas évident de parler des contraintes de l'évaluation sans traiter d'un contenu précis. Signalons juste que l'élaboration d'un savoir à enseigner se fait forcément avec le souci de connaissances acquises évaluables. Or, traditionnellement l'évaluation au niveau du lycée consiste le plus souvent en des "questions de cours" et des raisonnements plus ou moins complexes qui conduisent à un petit calcul accompagné éventuellement d'une application numérique. Les "capacités expérimentales" semblent plus difficiles à évaluer, malgré les efforts actuels en ce sens (BUP n° 786 et n°788), concrétisés au niveau du baccalauréat. De même la capacité à raisonner qualitativement demande, pour être évaluée, un effort parfois coûteux pour trouver une situation appropriée et une grille "objective" d'évaluation. Ceci pose évidemment des problèmes pour l'enseignement de l'acoustique au niveau du secondaire. Comme nous l'avons dit au-dessus, le savoir à enseigner, amputé du formalisme ondulatoire, s'appuie relativement peu sur le formalisme mathématique et les raisonnements mis en jeu semblent majoritairement qualitatifs. Pour sauver cet aspect quantitatif plus commodément évaluable, le savoir à enseigner peut alors renforcer l'importance de la lecture et de la conversion de mesure (comme avec l'oscilloscope par exemple) ou proposer de façon annexe des sujets qui apparaissent comme des techniques utiles à l'analyse du son ou à la compréhension du fonctionnement d'objets acoustiques. C'est en particulier ce que propose par exemple le savoir à enseigner actuel que nous analysons dans le paragraphe II.3. Nous n'affirmons pas que ce sont des contraintes d'évaluation qui ont fait apparaître dans le programme actuel des séquences sur la stroboscopie et la force de Laplace mais nous nous contentons à ce stade de constater que ces parties peuvent être facilement mises à contribution (et ainsi fournir un moyen pratique) pour évaluer certaines connaissances des élèves.

II.2.3.4 Contraintes de suivi disciplinaire

L'institution scolaire impose aussi une certaine cohérence dans toute formation disciplinaire, et ceci quelle que soit la filière choisie. Les savoirs à enseigner doivent non seulement ne pas être trop redondants d'une année sur l'autre mais doivent surtout pouvoir s'appuyer sur les savoirs enseignés antérieurement. Un contenu donné doit pouvoir s'appuyer sur des prérequis vus antérieurement mais également avoir une certaine utilité pour la suite du cursus. Cette dernière demande est surtout présente pour les filières scientifiques du secondaire et met en débat l'existence d'une classe de seconde indifférenciée (dans ce dernier cas, la noosphère a deux objectifs parfois antinomiques : intéresser et former le futur citoyen et donner des fondements scientifiques aux élèves qui continuent dans cette voie). L'acoustique peut facilement se trouver en porte-à-faux avec cette demande d'un suivi disciplinaire. En effet, son contenu élémentaire ne paraît pas assez vaste (comparé à celui d'un domaine comme la mécanique, l'électricité ou même l'optique) pour être abordé successivement dans différentes classes. S'il peut paraître utile à la noosphère, pour intéresser le plus grand nombre d'élèves, de proposer le son comme sujet d'étude à un large public pas forcément destiné à des études scientifiques, ceci peut néanmoins, dans certains cas et selon certains acteurs, présenter quelques inconvénients. L'enseignement à ce sujet doit en effet, pour pouvoir être viable, introduire suffisamment de notions fondamentales pour la suite des études scientifiques secondaires, au risque d'apparaître comme une parenthèse sans lien avec ou sans utilité pour le reste de la formation scientifique (on peut trouver ce type de jugement dans quelques réflexions d'enseignement au sujet de l'actuel programme (BUP n°788)). Tous se passe comme si il était nécessaire dans certaines conditions de trouver un équilibre entre une "culture générale" séduisante mais vite jugée superficielle par les détenteurs du savoir de référence et des savoirs plus proches du savoir savant destinés davantage à former le scientifique.

II.2.3.5 Bilan sur l'écart a priori entre savoir savant et savoir à enseigner

Les quelques points précédents permettent une délimitation grossière de ce que peut être le savoir à enseigner destiné à un élève débutant sur le sujet. Les contraintes évoquées, qui pèsent sur le processus de transposition, ne permettent pas de préjuger dans le détail des contenus d'enseignement présents et futurs. Ils permettent de dégager les différences quasiment inéluctables, résultats du processus de transposition, entre savoir savant et savoir à enseigner. Les écarts que nous allons mentionner ci-après sont en bonne cohérence avec ce que nous avons appelé le "noyau dur" historique (§II.1.2.2). Ils permettent surtout de dégager et de résumer les problèmes spécifiques qui sont posés au projet d'un enseignement d'un tel contenu. Ils permettent également d'éclairer sous un angle pertinent les contenus actuels de la classe de seconde que nous détaillerons dans le paragraphe II.3 suivant. Nous ne décrivons pas ici les écarts plus généraux (i.e. quel que soit le sujet abordé en physique) entre savoir savant et savoir à enseigner.

Les différences entre savoirs (et pratiques) du physicien et ceux à enseigner (ou enseignables) à un niveau élémentaire au sujet du son sont résumées dans le tableau II.2-2 suivant :

Tableau II.2.2 : résumé de quelques différences importantes entre savoir savant et savoir à enseigner au sujet du son.

	Savoir savant	Savoir à enseigner (pour un novice)
"objets" décrits et étudiés	source sonore onde dans le ou les milieux	source sonore son dans un milieu récepteur → prise en compte inévitable de la perception humaine (d'où existence de liens forcément simplificateurs entre excitation et sensation)
phénoménologie	de l'onde	de la perception (surtout)
outils de description de l'onde	fonction d'onde, champ de pression et de vitesse	représentations graphiques ou schématiques : visualisation d'images souvent fixes à instant ou endroit donné (signal fourni par un récepteur situé à un endroit donné ou représentation de l'état du milieu à un instant donné)
	interaction microscopique peu utilisée et représentation microscopique rare (le formalisme suffit)	recours à un modèle microscopique pour expliquer la propagation
Rapport aux objets techniques	objets communs, considérés uniquement comme des outils (leur fonctionnement est connu)	objets dont la fonction et le fonctionnement doivent être décrits et expliqués pour pouvoir être utilisés

Les réflexions menées jusqu'alors, dont les différences mentionnées dans le tableau ci-dessus sont une des conséquences, l'ont été hors d'un contenu précis d'enseignement, mais toujours au sujet d'un savoir introductif sur le son (destiné au novice). L'étude qui va suivre du savoir à enseigner actuellement dans les classes de seconde des lycées français va constituer un bon moyen de vérifier les processus et contraintes que nous avons évoqués. Il sera surtout possible d'étudier et d'analyser ces contenus grâce au cadre général que nous venons de développer, sans s'étonner de tel ou tel aspect. Ceci permettra alors de laisser plus de place à la description et l'analyse des savoirs effectivement enseignés, si tant est qu'on puisse y avoir accès.

II 3 Le savoir à enseigner actuel

Notre recherche tente de se placer dans un cadre plus général que le contexte actuel de l'enseignement du son en classe de seconde des lycées français, en particulier pour apporter des éclairages et réflexions utilisables dans d'autres contextes institutionnels (enseignement actuel du son dans certaines filières des lycées professionnels par exemple) ou temporels (enseignements futurs).

Il n'en reste pas moins que le contexte des investigations que nous avons menées est en grande partie celui de la classe de seconde indifférenciée actuelle dont le programme officiel comporte une large partie consacrée au son. D'un point de vue méthodologique il est donc tout naturel de préciser, d'analyser et de critiquer ce contenu. Cette réflexion permettra de réinvestir, avec plus ou moins de nuances, un certain nombre de spécificités mentionnées dans les parties précédentes.

II.3.1 Contexte et description du programme

Le programme actuel des classes de seconde a paru au Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale hors-série du 24 septembre 1992. Il est entré en vigueur à la rentrée 1993. Sa durée de vie aura donc été de 7 ans puisque de nouveaux programmes entrent en vigueur à la rentrée 2000. Cette durée de vie n'a rien d'exceptionnel (ni dans un sens ni dans l'autre) et ce type de renouvellement est relativement classique et peut être vu comme le signe d'une certaine usure normale du savoir, ce que Chevallard (1991) appellerait ici une obsolescence interne.

II.3.1.1 L'épistémologie du programme

Dans le texte d'introduction de tous les nouveaux programmes de l'époque ("Principes directeurs de l'enseignement de la physique et de la chimie au collège et au lycée"), il est possible de lire les objectifs sous-jacents sur ce que doit être la fonction de la physique, sur la façon dont elle fonctionne. Ce texte d'introduction générale à la réforme des programmes de l'époque s'inspire explicitement des textes de quelques "instances de réflexion" : il est ainsi fait cas de la prise en compte du texte de réflexion des sociologues P. Bourdieu et F. Gros "Principes pour une réflexion sur les contenus d'enseignement", du Rapport de la mission de réflexion sur l'enseignement de la physique, de la Déclaration du Conseil National des Programmes sur l'Enseignement des Sciences Expérimentales. La référence au savoir savant est explicite puisque les "*associations de spécialistes*" sont mentionnées. Il est donc possible d'identifier clairement ici des éléments de la noosphère.

Le programme de seconde entre bien sûr dans la logique de ces principes directeurs de l'enseignement de la physique au niveau du secondaire mais bénéficie à côté de ce texte d'un texte spécifique qu'il est également instructif d'étudier. Ce texte présente les objectifs et les contenus du programme, avant d'entrer dans le détail des contenus¹¹.

Globalement, les deux textes affirment la volonté d'un enseignement plus près du "monde extérieur", moins formel, moins vaste et favorisant la compréhension plutôt que les "recettes" recherchées pour le baccalauréat, ce qui est bien résumé par le but que s'est fixé le GTD¹² de l'époque : *séduire et former*.

Les idées force explicitement exprimées devenaient donc une bonne " **culture**

¹¹ L'essentiel des citations de ce paragraphe sont issues des deux textes évoqués. Les citations signalées par * sont issues du texte de présentation spécifique au programme de seconde générale et technologique. Les citations sans * sont issues du texte plus général "Principes directeurs de l'enseignement de la physique et de la chimie au collège et au lycée".

¹² Groupe Technique Disciplinaire

scientifique¹³ " (sans oublier de "former de futurs citoyens"), la " **curiosité** ", l'ouverture aux techniques (dont on trouve les fondements dans les sciences physiques), la "séduction" et l'ancrage **"sur l'environnement quotidien et les technologies modernes"** (pour "susciter des vocations de scientifiques"). Le problème est bien sûr amplifié pour une classe indifférenciée mais d'orientation comme la seconde : **"toute la difficulté pédagogique réside dans la nécessité d'apporter une culture générale de base accessible à tous mais aussi de permettre aux élèves de s'orienter"** *.

L'importance des objets techniques et d'une science tournée vers le monde extérieur, la vie quotidienne et les "applications" est donc hautement affirmée (**"La physique est dans tout et le moindre objet peut être prétexte à une analyse et une démarche scientifique"**). Cependant, dans un souci de légitimation par rapport à la discipline "physique", la différenciation par rapport à la technologie est clairement affirmée, comme si l'intérêt accru porté aux objets techniques menaçait automatiquement l'intégrité de la discipline. La physique marque sa différence par rapport à la technologie parce qu'elle amène l'élève **"à l'acquisition des capacités d'analyse, des concepts, des lois physiques et de leur utilisation"**. On sent bien ici la difficulté qu'il y a à faire de la physique à partir de l'étude de certains objets techniques, ce qui est pourtant préconisé ici. La méthode choisie dans le programme est globalement de partir des objets pour que les élèves aient **"compris à la fois le fonctionnement d'objets techniques mais surtout les lois physiques [...] et leur caractère universel dégagé de l'objet"**. Le contenu enseigné devra donc permettre une décontextualisation des savoirs envisagés. Leur recontextualisation pour l'analyse de nouvelles situations ou nouveaux objets n'est que très rapidement évoquée (**"Le retour à l'exploitation d'expériences simples et fondamentales pour illustrer le phénomène mis en cause est alors indispensable pour faire comprendre la généralité de la loi sous-jacente"** *). La physique apparaît donc bien, à travers ces objectifs généraux comme un moyen de décrire et d'analyser le réel avec des outils conceptuels (**"rendre notre monde intelligible"** **) qui peuvent avoir un domaine de fonctionnement et de pertinence plus large que celui qui a permis l'émergence de ces concepts (**"ces lois permettent de prévoir et d'imaginer des phénomènes ou des objets nouveaux"** *). Cette chronologie stricte faisant précéder toute avancée technique d'une découverte scientifique révèle d'ailleurs une épistémologie largement discutable et discutée (Caillot, 1994). Au regard de ce que nous avons exposé dans la partie II.2.2 au sujet des liens privilégiés entre l'acoustique et les phénomènes quotidiens, il n'y a alors rien d'étonnant de ce point de vue à voir le son apparaître comme sujet d'étude (cf. en particulier § II.2.2.1, II.2.2.5 et II.2.2.6).

L'appel à la relation avec d'autres disciplines est également mentionné, en particulier la musique et les sciences de la vie. Enfin, le programme mentionne comme il va maintenant de soi que **"les activités expérimentales ont une place essentielle"**. L'expérience "directe" ne doit pas être remplacée par l'ordinateur qui **"sera l'outil privilégié pour la saisie et le traitement de données ainsi que pour la simulation"**. De même, il est précisé que **"les activités proposées font une large part à l'utilisation des moyens technologiques modernes (vidéo, ordinateur)"**.

¹³ Les passages notés en gras le sont dans les textes officiels.

Nous ne disons rien ici de la longue liste des objectifs méthodologiques et des pratiques expérimentales recommandées. Nous les évoquerons en temps voulu, sur des sujets plus précis.

Le choix d'un "thème conducteur" est présenté comme un moyen d'atteindre ces objectifs généraux, **"un support, une réserve d'idées, un ancrage sur le quotidien"**. Il ne doit cependant pas remplacer l'enseignement **"par thème – objet d'étude"**.

En classe de 2^{nde}, le thème choisi est sensé susciter **"particulièrement l'investissement de nombreux adolescents : sons, reproduction des sons, musique et lumière"**. Ce thème est un détail du titre du programme : "LUMIÈRES et SONS" (on remarquera que, peut-être par soucis de symétrie, le terme *lumière* a gagné la marque du pluriel dans le titre). En pratique, le contenu se décompose en trois thèmes – objets d'étude : *tensions et intensités, sons et ultrasons, lumière*. Le son apparaît donc bien dans ce programme en tant que tel et non en tant qu'exemple ou illustration de phénomènes vibratoires et/ou ondulatoires (§ II.1.2.3).

II.3.1.2 Contexte, place du son dans le programme

Sans entrer davantage dans le détail de chaque partie du programme, il est intéressant de remarquer qu'à partir d'une motivation légitime, qui est aussi une contrainte sociale, au sujet des objets et phénomènes quotidiens sonores et lumineux, une partie d'électricité fasse son apparition. Il y a là implicitement un indice que lorsque la physique traite d'acoustique (ou d'optique), elle utilise des appareils électriques. Mais une telle utilisation ne nécessite pas forcément de posséder les savoirs présents dans la partie "électricité" du programme. L'appareillage électrique, lien invoqué pour faire ici de l'électricité (amplificateur, émetteurs et récepteurs sonores électriques, sources de lumière électriques), constitue de notre point de vue un alibi pour "faire de l'électricité". Cette activité paraît indispensable aux institutions savantes pour un enseignement de physique au secondaire. De plus, elle apparaît nécessaire pour la suite éventuelle du cursus secondaire (contrainte évoquée en II.2.3.3). La pratique enseignante semble confirmer cette tendance puisqu'une grande majorité d'enseignants y consacre plus de temps que ce qui est conseillé par le programme (Lestrade et al., 1996). Le côté quelque peu factice du lien entre électricité et acoustique est également confirmé par la pratique des enseignants dont quasiment la moitié semble ne pas utiliser la partie "électricité" dans la partie "sons" (Lestrade et al., 1996).

Les intitulés des trois thèmes sont déjà bien plus scientifiés que les motivations pratiques des textes généraux. Ainsi, le groupe de mots du champ quotidien *sons, reproduction des sons, musique* est devenu "SONS" dans le titre du programme mais débouche surtout sur un thème "sons et ultrasons". Si on met à part les quelques applications pratiques qu'ils induisent (quoique le SONAR et l'échographie ne sont pas forcément reconnus dans la vie quotidienne comme mettant en oeuvre ces pratiques), les ultrasons s'éloignent déjà du champ quotidien des individus et apparaît comme un terme technique scientifique. Il y a là un premier signe d'un mouvement général bien naturel vu les hypothèses de départ, de l'objet vers la science.

Du point de vue de la répartition de ces trois thèmes, les horaires "prévus" sont les

suivants, répartis selon les séances en classe entière et les séances de travaux pratiques :

· Tension et intensité : 10h classe entière, 4 TP ;

· Sons et ultrasons : 16h classe entière, 7 TP ;

· Lumière : 9h classe entière, 4 TP.

La partie sur les sons devrait donc couvrir 46% du temps d'enseignement en 2^{nde}, soit presque la moitié. Le temps passé en TP correspond à peu près au même pourcentage de temps total passé en TP.

Notons que l'ordre d'enseignement des trois thèmes n'est pas imposé par le programme. Cependant les commentaires et la présentation effectivement choisie dans le texte suggèrent une progression fidèle à l'ordre que nous venons de donner. Il ne fait par exemple quasiment pas de doute que c'est toujours l'électricité qui est présentée d'abord (elle doit être explicitement un outil pour la partie sur le son). Les deux autres parties peuvent par contre avoir été interverties, pour des raisons matérielles ou de choix personnel de l'enseignant. Nous n'avons pas de chiffres sur ce sujet mais il semble quand même, sans pouvoir le vérifier, que l'ordre du programme est respecté dans la majorité des cas et c'est en tout cas l'hypothèse qui transparaît dans les commentaires du programme. On n'oubliera pas que ces deux parties sont propices aux analogies entre ondes sonores et ondes lumineuses. Le rapprochement n'est effectué explicitement (dans les commentaires) que sur l'aspect ondulatoire (**"on introduit l'aspect ondulatoire de la lumière en parallèle avec le son (points communs et différences)"**), ainsi que sur milieu matériel, vitesse, longueur d'onde, et nature de la vibration).

II.3.1.3 Description du savoir à enseigner

On pourra se référer aux annexes pour une retranscription complète des textes du programme de la partie "sons et ultrasons". Nous ne donnons ici que les contenus sans mentionner ni les "activités support" (non obligatoires), ni les "compétences exigibles ou en cours d'apprentissage", ni les commentaires associés. Nous pourrions revenir au cas par cas sur certains de ces aspects (compétences exigibles ou activités support) pour éclairer notre propos mais l'objectif n'est pas ici de faire une description complète du savoir à enseigner.

1.

Émission sonore

—

Exemples d'émetteurs : la voix, le haut-parleur, les instruments de musique.

—

Période et fréquence d'un mouvement périodique.

—
Analyse stroboscopique d'un mouvement circulaire uniforme. Persistance des perceptions lumineuses. Applications : mesure d'une vitesse de rotation en tours/s ; principe du cinéma et de la télévision.

—
Principe du haut-parleur. *Fondements physiques* : action d'un aimant sur un conducteur parcouru par un courant. Expression de l'intensité de la force dans un cas simple : $F=kl$. Conditions de fonctionnement : limites sur l'amplitude (notion de puissance admissible), limites sur la fréquence (bande passante).

2.

Propagation et réception des sons et des ultrasons.

—
Le phénomène de propagation : déplacement de proche en proche du milieu matériel, exemples macroscopiques. Interprétation microscopique dans le cas du son. Vitesse de propagation. Onde sinusoïdale : longueur d'onde des sons et des ultrasons dans un milieu. Puissance sonore (Watts par m^2 et décibels).

—
Principe du microphone, un exemple de capteurs : le microphone électrodynamique. *Fondements physiques* : création d'une tension induite dans un circuit déplacé au voisinage d'un aimant.

—
L'oreille. Fréquences audibles. Ultrasons. Sensibilité de l'oreille. Stéréophonie.

—
Éléments d'acoustique géométrique. Expériences sur les ultrasons mettant en évidence la réflexion. Expériences sur les ultrasons mettant en évidence l'absorption. Principe du sonar et de l'échographie.

3.

Éléments d'acoustique musicale.

Hauteur et timbre d'un son : son fondamental et harmonique

On peut, à la lumière de cette première description, constater que ce programme est assez révélateur du "noyau dur" historique de l'enseignement de l'acoustique (§ II.1.2.2). On y décèle également l'importance donnée aux objets techniques (en particulier haut-parleur et microphone mais aussi instruments de musique, voire, hors de l'acoustique, télévision). Nous nous livrons par la suite (§ II.3.3) à une analyse critique de ces contenus. Il faut cependant dire que la relative densité du programme de 2^{nde} dans son ensemble (qui de l'avis des enseignants était trop long, chimie comprise) permet d'expliquer (en partie ?) les allègements de programme qui allaient survenir au mois d'octobre 1998.

II.3.1.4 Évolution du programme : des aménagements avant la suppression

Alors que les programmes de seconde sont en vigueur depuis déjà quatre ans, la nomination au printemps 1997 d'un nouveau Ministre de l'éducation Nationale laisse prévoir à plus ou moins long terme une réforme de ces programmes, l'histoire laissant suffisamment d'exemples de réformes suivant rapidement un changement de pouvoir. La prévision d'une refonte des programmes est en effet annoncée dès le mois d'avril 1998. Le Conseil National des programmes est alors chargé de **"préparer, en liaison avec les associations de spécialistes de l'enseignement secondaire, les aménagements nécessaire dans l'attente d'une prochaine refonte des programmes"**¹⁴. De fait, ces nouveaux programmes n'entreront finalement en vigueur qu'à la rentrée 2000 en classe de 2^{nde}, mais des aménagements des programmes en cours prennent effet dès leur publication, fin octobre 1998. Ainsi, sur les sept années d'existence de ce programme, deux auront été concernées par ces contenus allégés. Les allègements peuvent être appliqués en partie seulement (selon le travail déjà effectué dans les deux mois écoulés avant leur publication).

L'objectif affiché par le Ministre est de favoriser la réflexion et la compréhension et de recentrer les programmes **"autour des savoirs fondamentaux qui seront ainsi mieux compris et mieux maîtrisés"** (ibid.). Dans le cas de la physique, ce sont certains manuels qui sont incriminés parce qu'ils auraient chargé les programmes **"par la multiplication d'exemples redondants et un développement excessif d'applications technologiques"**. On voit là d'une part comment le savoir à enseigner peut être perturbé par la pratique concrète (voir aussi § II.3.2), d'autre part quelle dérive a pu être engendrée par l'importance donnée aux objets techniques. Ce dernier point est révélateur du difficile équilibre à trouver pour la physique à enseigner entre une science proche du monde matériel quotidien et une science "théorique" et conceptuelle.

L'électricité, peu amputée, est cependant à nouveau présentée comme secondaire par rapport à **"l'essentiel (les ondes)"**. La partie "sons et ultrasons" est lourdement touchée, par allègement **"d'un certain nombre de considérations peu précises, peu abordables à ce niveau et non essentielles"**. Nous décrivons ci-après les allègements, sans forcément utiliser des citations littérales :

- les analogies ondulatoires (cuves à ondes ou "échelles de perroquet") sont vivement encouragées pour une première approche des notions de fréquence, période longueur d'onde, vitesse de propagation (les "analogies mécaniques" n'étaient auparavant citées que pour illustrer le phénomène de propagation) ;

- au sujet du haut-parleur, seule la notion de bande passante est supprimée ;

- la rubrique "Interprétation microscopique du son" doit être limitée à l'affirmation que **"le son est une oscillation de pression qui se propage"** (les passages évoquant l'aspect

¹⁴ C. Allègre (B.O.E.N. n°12 du 29 octobre 1998, hors-série, p.3)

microscopique dans les commentaires sont également supprimés) ;

les calculs liés à la formule reliant vitesse de propagation, longueur d'onde et fréquence sont supprimés mais la relation doit être vérifiée expérimentalement (ceci était déjà suggéré avant les allègements) ;

l'allusion à l'énergie qui se propage de l'émetteur au récepteur est supprimée ;

l'acoustique géométrique est supprimée ;

en acoustique musicale, un bon nombre de points sont supprimés, en particulier le fait de montrer que deux sons différents de même hauteur ont même fréquence fondamentale. Globalement, seule reste à ce sujet l'analyse harmonique à l'aide de l'ordinateur.

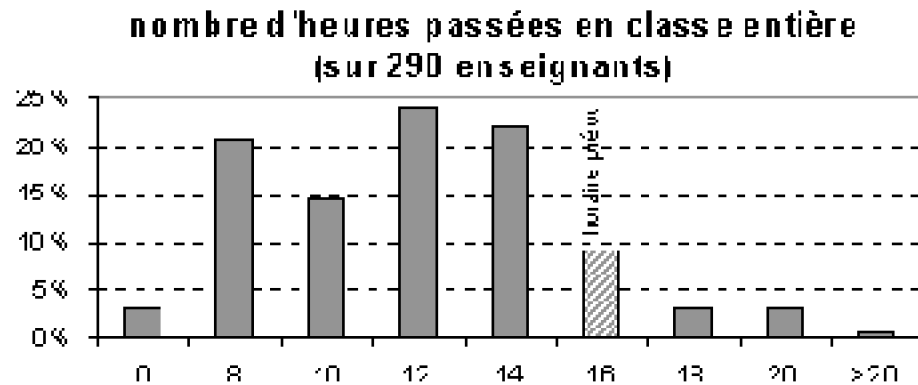
Il est donc manifeste que les allègements touchent toutes les sous-parties de la partie "sons et ultrasons". Une analyse critique rapide de ces allègements sera effectuée à la fin de cette partie II.3.

II.3.2 Du savoir à enseigner au savoir enseigné

Comme notre recherche étudiera entre autres choses l'évolution conceptuelle d'élèves ayant suivi ce contenu d'enseignement, il nous intéresse de ne pas borner notre analyse au savoir à *enseigner* mais de tenter d'obtenir des indices sur les pratiques effectives en classe de physique concernant cette partie du programme. Nous nous approchons donc ici du savoir *enseigné*. Ce qui peut être considéré comme une deuxième phase de transposition didactique est évidemment difficile à décrire du fait de la difficulté à connaître le savoir effectivement enseigné. Le savoir enseigné n'a pas l'uniformité du savoir à enseigner puisqu'il n'est plus perceptible par un texte écrit et qu'il dépend de nombreux paramètres (enseignant, matériel, type de public...). Il est donc quasiment impossible d'en faire une description précise sans observation spécifique des séances d'enseignement, en acceptant en outre de se restreindre à une classe donnée. Nous ne nous lançons donc pas dans cette entreprise ici mais nous donnons quelques grandes tendances les plus objectives et représentatives possibles que nous pouvons trouver dans la littérature, en particulier grâce à une enquête de l'UdP auprès des enseignants (Lestrade et al., 1996).

Un fait d'abord tout à fait significatif, qui nous semble assez révélateur de l'attitude globale du corps enseignant face à la partie "sons et ultrasons" : les consignes concernant les deux horaires prévus pour cette partie dans les textes officiels ne sont globalement pas suivies. Après deux années d'existence de ce programme, parmi 298 enseignants interrogés par l'Union des physiciens, plus de 80% affirmaient passer moins de temps que conseillé sur ce sujet, aussi bien en classe entière qu'en TP, la différence se faisant au profit de l'électricité. Il est cependant signalé que les élèves suivant la classe de seconde à cette époque n'ont pas suivi les nouveaux programmes de 3^e et n'ont donc

fait que très peu d'électricité, ce qui a pu avoir un effet amplificateur de ce contenu en seconde. Comme le montre la figure II.3-1 ci-dessous, les "libertés" réductrices par rapport à l'horaire officiel peuvent même devenir importantes.



¶

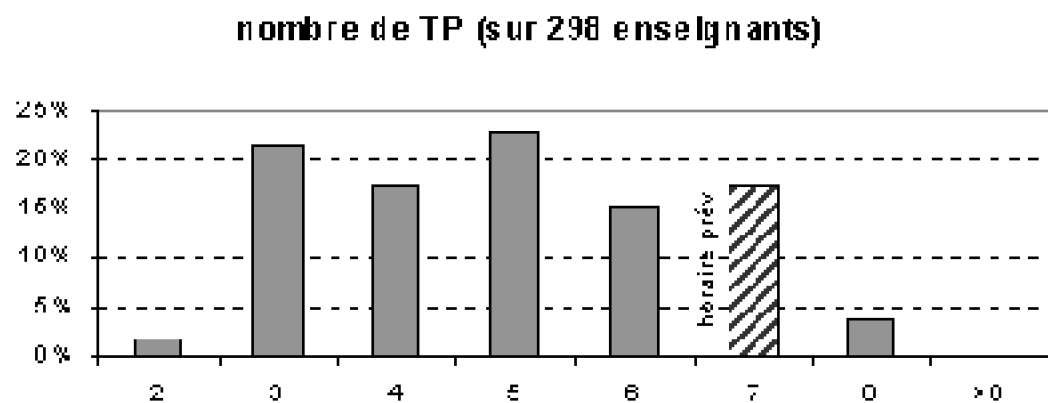


Figure II.3-1 : Temps effectif passé à traiter la partie "sons et ultrasons" par un échantillon de 298 enseignants (d'après enquête de l'Union des Physiciens, Lestrade et al., 1996)

Il peut donc paraître surprenant de voir les allègements de programme toucher de façon conséquente cette partie au motif que les contenus seraient trop nombreux vus le temps imparti. Une interprétation quelque peu naïve pourrait en effet laisser croire que cette minoration du temps passé sur la partie indique un volume de connaissances trop faible pour les 26h30 prévues. On peut raisonnablement penser que ceci est plutôt le signe d'un relatif désintérêt des enseignants pour le sujet qui lui-même peut prendre racine dans diverses causes : goût personnel, épistémologie propre (du type "ce n'est pas de la physique"), difficulté pour enseigner un tel sujet, sujet jugé trop difficile ou trop facile pour les élèves (les deux opinions sont mentionnées en proportion sensiblement égale dans l'enquête mentionnée), difficulté à évaluer, manque de matériel... Il nous est difficile de privilégier objectivement l'une ou l'autre de ces causes. Cependant, nous pensons qu'il est raisonnable de mettre en lumière les pratiques nouvelles induites par cet enseignement, tant au niveau de l'évaluation (évaluer des méthodes, des raisonnements plus que des capacités à mettre en équation et calculer) que des activités expérimentales

(vérifier une loi, activité la plus habituelle en TP, n'est que marginale ici) et de la place qui leur est accordée par rapport aux séances en classe entière habituellement réservée au cours. Notre expérience personnelle des échanges avec de nombreux enseignants permet aussi de signaler un jugement de relative inutilité du contenu pour les élèves poursuivant un cursus scientifique (contrainte étudiée en II.2.3.4).

Parmi les enseignants ayant répondu à cette enquête, 10% demandent la suppression pure et simple de la partie alors que 19% réclament une réduction de cette partie. L'UdP reprend à son compte ces propositions en demandant officiellement la réduction de cette partie sans préciser ce qui doit être supprimé (Bureau National de l'UdP, 1996). Ceci a probablement fortement pesé sur les allègements effectués trois ans plus tard. Les allègements de programme apparaissent bien dans ces conditions non comme une suppression de contenus qu'il n'est pas possible d'enseigner dans le temps imparti, ce qui est pourtant la justification officielle mais comme un désir de satisfaction de cette demande de réduction qui ne concerne pourtant qu'une minorité des enseignants (cette réduction permettant alors de passer plus de temps sur l'électricité, ce qui avait été demandé officiellement par l'UdP). Dans la logique de ces allègements, la suppression devenait alors fort probable. On voit bien ici la perte de légitimité du thème par rapport au savoir savant (ce sont quelques universitaires qui ont décidé des aménagements, en tenant compte en particulier des opinions de l'UdP).

Paradoxalement, les enseignants interrogés proposent le plus souvent de supprimer le haut-parleur et le microphone, l'expression de la force de Laplace ainsi que, dans une moindre mesure la stroboscopie. Ceci peut paraître paradoxal car ces parties sont en effet propices à ce qui est reconnu comme "faire de la physique". Elles sont le moyen de mettre en évidence des phénomènes généraux en physique (induction, force de la Laplace), mais qui n'ont pas besoin de l'acoustique pour exister dans un corpus d'enseignement. En ceci, ce sont des sujets classiques de l'enseignement secondaire, dont la légitimité est forte et stable. Il est d'ailleurs remarquable de constater que la réduction effectivement réalisée par les allègements ne concerne aucun de ces sujets.

Ce rapide tour d'horizon forcément réducteur des opinions des enseignants tranche avec ce qu'on observe lorsqu'on se tourne vers les élèves. Les enseignants interrogés jugent dans leur majorité les élèves intéressés, un tiers les jugeant moyennement intéressés. Ces pourcentages sont cependant nettement inférieurs aux pourcentages correspondants pour l'électricité ou la lumière. Il ne faut pas sous-estimer ici une possible perturbation de ces avis par la préférence propre de l'enseignant qui a tendance à projeter son intérêt sur celui de l'élève ou à effectivement motiver l'élève par l'enthousiasme qu'il met à enseigner un sujet plutôt qu'un autre. Car lorsque ce sont effectivement les élèves qui sont interrogés (Burgat, 1996), les thèmes jugés les moins intéressants (312 élèves interrogés) sont les thèmes de l'électricité alors que stroboscopie, haut-parleur/micro et ultrasons sont jugés les plus intéressants. Mais on peut également résumer cette enquête en disant que ce qui est le plus intéressant est le moins bien compris (toujours de l'avis des élèves eux-mêmes). On retrouve ici la difficulté posée au système didactique d'enseigner de la physique à partir d'objets ou d'expériences spectaculaires (c'est le cas de la stroboscopie par exemple). Les parties sur le haut-parleur et le microphone échappent quelque peu à la règle puisqu'elles sont jugées à la fois intéressante et assez

bien comprises. La partie sur les ultrasons est jugée bien mieux comprise que celle sur la stroboscopie. Il est d'ailleurs assez surprenant que les 5 thèmes proposés aux élèves dans l'enquête citée ne soient pas tout à fait les mêmes que ceux du programme mais redécoupés d'une façon qui nous semble révélatrice du savoir effectivement enseigné : *tension et intensité, amplification de tension, stroboscopie, micro/haut-parleur, ultrasons*.

II.3.3 Analyse critique du programme et des allègements

Nous venons donc de voir comment les contraintes de transpositions évoquées en II.2 pouvaient trouver leur conséquence pratique dans la détermination d'une part du savoir à enseigner d'autre part dans le savoir qui s'enseigne. Nous nous livrons dans ce paragraphe à une analyse générale de la partie "sons et ultrasons" du programme de seconde, en tenant compte des remarques faites au sujet du savoir enseigné mais sans préjuger plus que possible des pratiques effectives en classe. Ce travail permet d'aller plus loin dans la description des contenus mais également de mettre en lumière les points sur lesquels nous ferons des propositions, en restant dans le cadre du programme (Partie B et C).

II.3.3 1 Un alibi pour d'autres sujets

A la première lecture d'une partie intitulée "sons et ultrasons", on peut être surpris de voir figurer l'analyse stroboscopique d'un mouvement circulaire uniforme, le principe du cinéma et de la télévision ou encore dans les compétences exigibles "citer des applications de la stroboscopie". Le son comme phénomène est ici clairement mis entre parenthèses et seul le physicien est capable d'entrevoir le lien possible entre l'étude de l'émission sonore et la stroboscopie. Nous qualifions alors ce type de savoirs d'*annexes* puisqu'il n'entretiennent pas de lien direct avec l'étude des sons perçus ou des ondes sonores. La stroboscopie n'est là que comme outil d'analyse des mouvements rapides (les mouvements rapides à analyser étant finalement ceux d'un émetteur sonore, en pratique souvent la membrane d'un haut-parleur dont la fréquence de vibration doit être comparée et égale à la fréquence de la tension d'alimentation). Des savoirs annexes sont également présents dans le programme sous l'étiquette *Fondements physiques* (voir tableau II.3-1), comme pour spécifier la portée bien plus générale que le seul contexte acoustique. Il s'agit de la loi de Laplace et de l'induction électromagnétique. Les deux objets-prétextes dont il faut expliquer le principe sont bien sûr le haut-parleur et le microphone électrodynamique. De plus, la loi de Laplace constitue un prétexte idéal pour l'activité expérimentale classique qui consiste à vérifier une loi (Tiberghien et al., 1998), un objectif méthodologique (exploitation graphique de mesures) et la possibilité de faire des calculs formels ou numériques (influence de la contrainte d'évaluation puisque la capacité à mener des calculs est facilement évaluable). Dans un article consacré à l'enseignement de la loi de Laplace en seconde, Luc et Durey (1997) montrent bien le problème de la cohérence interne des savoirs prescrits à ce sujet. Ils précisent ainsi que **"le modèle réductionniste $F=k.i$, établi en courant continu sur une partie du haut-parleur est incapable d'interpréter, à lui seul, la proportionnalité entre le déplacement x de la membrane et l'intensité i . Il est évidemment encore plus incapable d'expliquer le comportement du haut-parleur en courant alternatif"** (Luc &

Durey, p. 43). Ces auteurs remarquent ainsi qu'un seul des deux phénomènes principaux antagonistes régissant le mouvement de la membrane (force électromagnétique et élasticité de la suspension de la membrane) est pris en compte. Ces difficultés sont effectivement rencontrées lors des séances à ce sujet. Il y a donc un décalage manifeste entre les objectifs attribués à cette portion du programme et ce qu'elle peut réellement permettre. Finalement, il semble que ce soit des raisonnements qualitatifs qui servent d'outils pour expliquer le fonctionnement du haut-parleur et si finalement, **"le temps consacré à son étude et à son principe est souvent limité, voire inexistant"** (p. 66), les élèves passent cependant quasiment une séance de TP à établir expérimentalement la loi, par relevé de mesures en courant continu. On pourrait alors préférer comme ces auteurs, l'établissement d'un modèle expérimental établissant la proportionnalité entre déplacement de la membrane et intensité du courant, ce qui permet au moins d'expliquer le lien entre fréquence de la tension électrique et fréquence de vibration de la membrane (via la loi d'Ohm), ainsi qu'entre l'amplitude de la tension d'alimentation et l'amplitude de vibration.

Sur les 31 compétences exigibles ou en cours d'apprentissage, quasiment un tiers (9 exactement) concernent ces trois domaines annexes et sont formulées entièrement hors contexte acoustique puisque aucune référence au son n'y est faite. Ceci permet de comprendre comment ces parties gagnent en pratique leur autonomie, que ce soit en classe ou dans les manuels scolaires. Un bon exemple de ceci est le découpage mentionné dans le paragraphe précédent : stroboscopie, haut-parleur/micro, ultrasons.

Cette façon d'introduire des "fondements physiques" à partir d'objets répond bien à l'objectif visé de partir des objets de la vie quotidienne pour faire de la physique, puis pour éventuellement revenir aux objets (figure II.3-2).

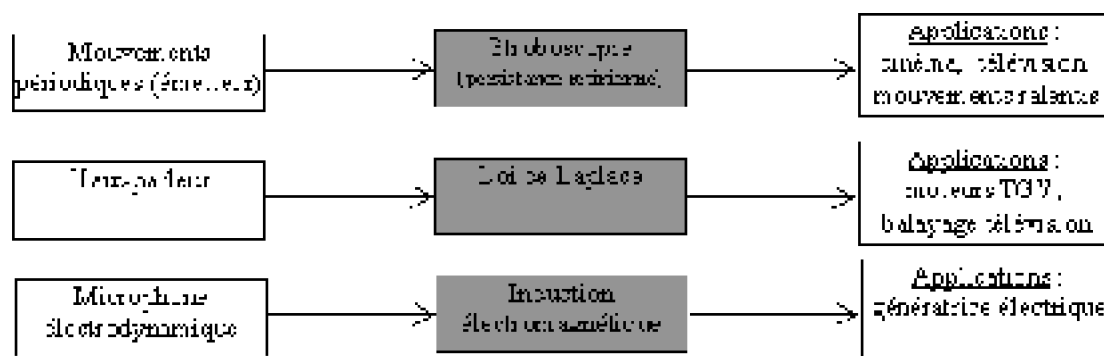


figure II.3-2 : Introduction d'un domaine de savoirs annexes à l'aide d'un exemple du champ expérimental et retour aux applications quotidiennes.

Mais il n'y a alors plus que l'objet de départ qui a un rapport plus ou moins strict avec le son et les savoirs en jeu sortent complètement du champ phénoménologique sonore. On peut alors légitimement se demander si ce qui est enseigné est toujours de l'acoustique. Désormais, lorsque nous analyserons les savoirs au sujet du son, nous ne prendrons pas en compte ces trois "blocs" d'enseignement. Il n'est pas question de critiquer la présence, sur le fond, de domaines annexes. L'intérêt pédagogique peut être réel pour montrer que la physique peut décrire le monde en puisant dans différents domaines (quoique ceci ne prenne sens que lorsqu'on a une vision des différents

domaines, donc lorsqu'on est physicien). Il est par contre dommage que ces sujets prennent autant de place, d'autant qu'ils semblent poser des problèmes importants aux élèves (qui par exemple ne connaissent quasiment rien sur le concept physique de force) (Lestrade et al., 1996, Burgat, 1996).

II 3.3.2 Un décalage entre l'ancrage dans le monde et la physique enseignée

Types de compétences en jeu Nous avons vu que le programme de seconde était novateur par rapport à ses prédécesseurs dans la mesure où il tente de présenter des savoirs non pas à partir de thèmes généraux de la physique (mécanique, optique, etc...) mais à partir de phénomènes du quotidien. Nous avons vu très vite également le retour à des domaines classiques de physique, non seulement les domaines attendus (le son fait faire de l'acoustique) mais aussi des thèmes plus surprenants empruntés à des domaines non attendus ici (électromagnétisme à partir du haut-parleur et du microphone). De la même façon, l'ancrage affirmé fortement dans l'expérience et le monde réel, au lieu de favoriser l'apprentissage de savoir-faire qu'on pourrait en attendre, se traduit en fait essentiellement par des compétences exigibles qui s'expriment plutôt en termes théoriques ou conceptuels. Tout en montrant bien que le terme "compétences exigibles" pose problème à la physique par la diversité de ce qu'il peut recouvrir, M. Caillot (1994) décompte les compétences associées d'une part à des savoirs déclaratifs, d'autre part à des savoir-faire. Sur 31 compétences exigibles ou en cours d'apprentissage de la partie nous concernant, il en dénombre alors seulement 5 associées à des savoir-faire (dont "tracer un graphique" pour vérifier la loi $F=kl$ ¹⁵). Les aménagements de programme ne change pas le déséquilibre évoqué ici (par exemple le savoir-faire consistant à appliquer la formule $\lambda = v/f$ est juste changé en une vérification expérimentale de la même formule).

Peu de recours à l'audition Dans le même ordre d'idée, il est surprenant de constater que le recours explicite à l'audition est rare. Il est bien sûr difficile d'évaluer effectivement la fréquence des phases d'écoute en classe. De plus, si nous nous en tenons aux compétences exigibles et activités support (ces dernières n'étant que proposées), il est clair que les activités mentionnant explicitement une perception auditive sont quasiment inexistantes. On peut juste mentionner l'expérience de la sonnette sous vide (la perception est réduite au minimum car il s'agit de repérer un son ou le silence) et l'étude de la fréquence de deux sons de même hauteur (si tant est que le jugement de même hauteur se fasse auditivement). Dans toutes les autres activités proposées, s'il peut y avoir bien sûr des sons émis et inévitablement entendus, l'activité ne consiste pas à écouter et interpréter mais la réception est toujours instrumentalisée. On retrouve donc là une pratique proche de la physique savante dans le domaine (§ II.2.1). Les commentaires sont assez cohérents avec cette vision des choses puisque le son y est jugé parfois inaudible. Dans ce cadre de négligence de la perception auditive, il n'y a effectivement rien de gênant (mais plutôt que des avantages) à inscrire au programme l'utilisation et l'étude des ultrasons. Vouant d'une part partir du sens courant du terme son, d'autre part mettre donner une place privilégiée à la perception

¹⁵ les quatre autres sont : utiliser l'oscilloscope pour étudier un son, mesurer la longueur d'onde à l'aide d'un ou deux microphones, calculer une vitesse de propagation à partir de la formule $\lambda = v/f$, montrer l'égalité des fréquences fondamentales de deux sons différents de même hauteur à l'aide d'un oscilloscope ou d'un ordinateur.

pour l'enseignement, nous réfutons le fait que les sons puissent être inaudibles, en adoptant le terme d'onde sonore pour désigner l'ensemble des signaux acoustiques, audibles ou non. Le point de vue adopté par le programme à ce sujet nous paraît quelque peu gênant dans la mesure où il est possible dans bien des cas de proposer des interprétations simples basées sur des perceptions auditives.

Un écart entre sons d'étude et sons quotidiens Il n'est pas étonnant de voir l'onde sinusoïdale à une place privilégiée dans le programme. Elle présente d'une part une simplicité de "forme" remarquable, elle est obtenue avec un objet simple tel que le diapason mais elle présente aussi un intérêt théorique qui est appelé à être réinvesti dans la partie où il est question d'analyse harmonique. De plus, les signaux électriques sinusoïdaux fournis à un haut-parleur pour la créer ou par un microphone la captant sont parmi les rares signaux électriques que les élèves connaissent alors et pour lesquels ils peuvent normalement facilement identifier période et amplitude. Les "sons sinusoïdaux" sont donc largement utilisés, et ceci n'est en rien spécifique à ce programme. Cependant la création, la perception et l'analyse de ce que nous pouvons appeler des "sons d'enseignement" contribue à creuser le fossé entre les sons quotidiens du monde réel et les sons que l'apprenant va percevoir dans la salle de classe. Quoi de commun pour l'élève entre le Générateur Basse Fréquence qui permet ces sons et la chaîne Hi-fi ? Quoi de commun entre les sons musicaux qu'il écoute à longueur de journée et les sons purs et bien stables dans le temps (en tous les cas pas toujours agréables) que l'enseignant lui propose d'entendre ? Ce sont là des questions que la physique élémentaire a parfois du mal à aborder et qui, en tous les cas justifient une partie sur l'acoustique musicale.

Des concepts dont on privilégie plutôt l'utilisation mathématique que la compréhension

Nous avons déjà parlé de la commodité qu'il y a à évaluer des capacités de calcul (formel ou numérique). De plus, cette pratique contribue à diminuer la distance entre savoir savant et savoir à enseigner. Hors du formalisme ondulatoire, l'acoustique élémentaire se prête assez mal à ce type d'activité. Pourtant on trouve dans le programme un certain nombre de formules simples ou de grandeurs physiques dont il faut connaître les ordres de grandeurs (les intensités acoustiques en décibel par exemple) et dans les manuels scolaires la plupart des exercices donnent lieu à des calculs sur ce sujet. La quantification et la mesure, autres moyens de mettre en oeuvre cette pratique, ont ainsi une importance qui peut ici paraître surprenante. Il nous est permis de craindre que cette "mathématisation", même sommaire, se fasse au détriment, parfois, de la compréhension des concepts. Nous pouvons citer pour argumenter notre propos les formules explicitement au programme, la première citée faisant partie des savoirs annexes : $F=kl$ (Loi de Laplace) et $\lambda = v/f$. On peut y ajouter la formule nécessaire pour la mesure directe de la vitesse du son, activité support proposée (distance divisée par le temps nécessaire, en considérant implicitement que la vitesse est constante), ainsi que les exercices visant à calculer une fréquence à partir de la période ou l'inverse. Dans le premier cas ($F=kl$), le concept de force n'est pas expliqué et l'élève n'y a accès que par des "astuces" expérimentales qui ne sont pas

forcément simples à comprendre elles-mêmes. Pour la formule exprimant la longueur d'onde, qui donne lieu elle aussi à beaucoup d'exercices dans les manuels, le calcul d'une des trois grandeurs à partir des deux autres apparaît explicitement comme compétence exigible. La longueur d'onde n'est définie dans les textes officiels que par cette formule (λ est vT et **"caractérise une onde sonore sinusoïdale de période T et se propageant à la vitesse v "**). Comme nous l'avons déjà dit, le remplacement issu des aménagements du calcul par la vérification expérimentale de la formule ne favorise pas forcément (loin de là) la compréhension des concepts et du pourquoi de cette formule. Il nous semble dommage de privilégier ce genre d'activités, qui contribue à donner de la physique une image de science arbitraire, figée et calculatoire, au profit d'activités visant la compréhension des concepts. Cette compréhension peut dans un second temps permettre une formalisation qui ne vient plus de nulle part.

II.3.3.3 Des connaissances qualitatives mais sans véritable modélisation

Il y a probablement un décalage entre le poids des calculs dans le savoir à enseigner (il n'y a que deux formules explicitement citées dans les 31 compétences exigibles) et l'importance que la pratique et les activités effectives leur consacrent. L'essentiel des contenus reste donc quand même qualitatif. Il s'agit par exemple de connaître les conditions d'existence d'un son, le **"domaine des fréquences audibles de l'oreille humaine"**, d'expliquer **"pourquoi le haut-parleur émet des sons de fréquence égale à celle de la tension appliquée"** ou encore de savoir pour le phénomène de propagation que **"les vibrations de l'émetteur engendrent de proche en proche celles du milieu"** (B.O. E. N., septembre 1992).

Il est alors remarquable de constater que les connaissances déclaratives et procédurales qui sont mentionnées dans le programme induisent peu d'activités de modélisation, au sens où les élèves seraient invités à utiliser un modèle de la physique (et à en avoir conscience) pour interpréter et/ou prévoir des situations expérimentales ou empiriques. Cette activité n'est pas même mentionnée dans les textes introductifs (activités à privilégier) ou dans les commentaires (alors que modéliser occupe une place importante dans le programme de chimie). Nous ne parlerons pas ici des savoirs annexes qui peuvent induire l'utilisation d'un modèle (on peut penser en particulier à la loi de Laplace). Pour le son en tant que tel, il nous semble important de signaler deux points propices à l'activité de modélisation.

D'une part, la compétence exigible **"un émetteur sonore est une surface vibrante qui met en mouvement le milieu matériel au voisinage"** peut être l'occasion de relier tout son perçu avec la vibration d'une surface matérielle ainsi que les liens qui sont indiqués dans le programme entre les caractéristiques du son et de la vibration (lien explicite pour hauteur et fréquence, implicite pour intensité et amplitude). Ce sera le sens du "Modèle de la vibration sonore" que nous développerons plus loin.

D'autre part, le mécanisme de propagation est explicitement au programme puisqu'il est attendu que l'élève **"sache que les vibrations de l'émetteur engendrent de proche en proche celles du milieu"**. Les exemples macroscopiques sont également mentionnés ainsi qu'une interprétation microscopique. Dans les commentaires, il est indiqué que la

description microscopique contribue également à la construction d'une représentation correcte des phénomènes, sans précision au sujet de la nature de cette description. Quel modèle microscopique est alors choisi ? Un modèle microscopique aurait pu être avantageusement décrit dans le programme. De plus il n'est fait aucun lien entre description microscopique et longueur d'onde, alors que celle-ci pourrait par ce biais prendre un autre sens que la distance parcourue par le son pendant une période. Les aménagements n'ont pas contribué à préciser cette partie, tout au contraire puisqu'il suffit dès lors de borner cette partie à l'affirmation selon laquelle **"le son est une oscillation de pression qui se propage"**. Nous pensons pour notre part que seul le physicien est apte à capter le sens d'une telle phrase. Pour l'élève les concepts d'oscillation et de pression ne sont pas clairement définis et quand bien même ils le seraient indépendamment, que devient alors une oscillation de pression qui se propage ? Nous proposerons dans la suite de notre travail un modèle microscopique de la propagation des sons.

L'élaboration et l'utilisation des deux modèles descriptifs que nous venons d'évoquer restent entièrement à la charge de l'enseignant, alors que ces phases nous paraissent fondamentales pour une compréhension élémentaire des phénomènes sonores.

II.3.3.4 Des aménagements de programme parcellaires

Nous avons déjà évoqué à plusieurs reprises les aménagements de programme. Nous voudrions seulement revenir ici sur l'aspect parcellaire des aménagements. Comme nous l'avons vu, l'alibi d'un programme trop long ne tient pas en ce qui concerne le son puisque les temps d'enseignement conseillés sur cette partie ne sont pas atteints. Les allègements nous apparaissent comme un saupoudrage de suppressions de petites entités de savoir concernant tous les sujets abordés, sans cohérence d'ensemble. Les exemples redondants incriminés n'apparaissent pas dans les suppressions (ce qui est rassurant, la redondance ne valant souvent que pour le physicien), de même les applications technologiques qui sont sensées "charger" le programme restent présentes. Enfin, la phrase citée dans le paragraphe précédent au sujet de l'oscillation de pression qui se propage nous paraît caricaturale d'une présentation dogmatique ou axiomatique, dont il est pourtant précisé dans le préambule de l'aménagement qu'elles doivent être évitées. Ainsi, d'une part, le programme perd en cohérence mais il est en plus facile de constater un décalage important entre les intentions affichées des aménagements et les suppressions décidées.

Chapitre III Caractérisation des savoirs et structures de connaissances chez les apprenants : le cas du son.

Nous abordons dans cette partie une revue à la fois théorique et contextuelle des travaux sur les connaissances des apprenants, sur les structures éventuelles qui les organisent, sur les moyens de les caractériser et sur les processus de modification de ces

connaissances. Nous pouvons regrouper tous ces termes sous l'expression plus générale de systèmes explicatifs, dont nous préciserons le sens au chapitre VII.

Ce chapitre, essentiellement bibliographique, empruntera donc d'une part à des travaux de psychologie (ou d'épistémologie) d'autre part à des travaux de didactique lorsque nous aborderons plus concrètement les conceptions mises en évidence au sujet du son.

Il est important de signaler dès maintenant que les travaux sur les conceptions au sujet du son sont moins nombreux que pour d'autres domaines de la physique enseignée. Ceci peut être dû à la relative absence, en France et depuis l'émergence de la didactique, de ce sujet d'enseignement en tant que tel (plutôt intégré à un thème plus large sur les ondes) dans les programmes du secondaire. Si le sujet a fini par être abordé en France, il est cependant nécessaire d'observer les travaux qui ont pu être menés dans d'autres pays. Dans ce dernier cas, il garde à l'esprit que certains concepts caractérisant les systèmes de pensée ont été créés en anglais et que leur traduction en français est toujours délicate.

Nous étudierons essentiellement les conceptions de novices sur le sujet (enfants ou élèves du secondaire avant enseignement). Cependant, nous présenterons également quelques résultats concernant des étudiants ayant déjà reçu un enseignement sur le sujet. Ceci nous permettra en particulier d'envisager le repérage de conceptions plus difficiles à faire évoluer que d'autres.

III.1 Repères théoriques

III.1.1 Caractérisation des savoirs quotidiens et des savoirs de la physique

Dans le cadre général de notre travail, qui concerne l'enseignement et l'apprentissage de la physique des phénomènes sonores pour le débutant, il nous paraît important de donner quelques repères théoriques permettant d'analyser les savoirs en jeu dans des situations d'enseignement et dans les processus d'apprentissage. Ceci nécessite dans un premier temps d'analyser et de caractériser les savoirs qui vivent dans la discipline, comment ils sont organisés, puis dans un second temps de tenter de mener les mêmes analyses pour les savoirs quotidiens. Ces quelques réflexions reprennent en partie celles développées par ailleurs (Tiberghien, 1999).

III.1.1.1 Cadre général d'analyse : revue des systèmes explicatifs

Nous considérons dans un premier temps que lorsqu'un individu est amené à donner une explication, une interprétation ou une prédiction au sujet d'un événement du monde sensible, il met en relation des concepts avec ses perceptions. Il est donc capable d'utiliser ces concepts et de leur attribuer certaines propriétés. En d'autres termes, il établit des liens entre les objets et les événements d'une part et ses propres **systèmes explicatifs** d'autre part, les seconds étant utilisés en référence aux premiers. Ces systèmes explicatifs font appel à des concepts plus ou moins complexes mais également à des liens entre ces concepts ou encore à des relations causales. Ils peuvent être vus

comme des théories naïves (Carey, 1985) ou plus généralement comme toute structure conceptuelle que les travaux de recherche ont pu mettre en évidence grâce à la production, par les individus, d'invariants dans la description et/ou l'explication qu'ils font des objets et des événements. La question se pose alors de savoir à quel point ces systèmes explicatifs dépendent de la situation proposée et finalement quel degré de généralité ils possèdent : ce sera l'objet spécifique de l'expérimentation que nous proposerons dans les chapitres VII et VIII.

Nous considérons dans un premier temps, pour analyser les processus d'enseignement et d'apprentissage, que les éléments d'ordre conceptuels et ceux d'ordre perceptifs sont imbriqués (Gooding, 1992). Nous adoptons ce cadre général pour caractériser d'une part les savoirs du physicien d'autre part les savoirs quotidiens. Si cette imbrication ne pose généralement pas de problème au physicien, elle peut en revanche être un obstacle à l'apprentissage de la physique par l'élève. Dans une optique d'enseignement et d'apprentissage, il faudra pouvoir désimbriquer ces éléments pour pouvoir proposer à l'élève des éléments d'ordre théorique qu'il mettra en relation avec les objets et les événements. Les relations entre ces deux facettes perceptives et conceptuelles seront approfondies dans la partie B lorsque nous analyserons l'activité de modélisation. En effet, établir un lien entre d'une part ce qui est perçu dans le monde des objets et des événements et d'autre part ce qui est d'ordre plus théorique, plus abstrait, ce qui peut en fait recouvrir une structure de modèle, consiste à modéliser. Nous nous bornons pour notre part à une description relativement statique des savoirs en jeu, sans nous intéresser dans ce paragraphe aux modifications dynamiques des structures de savoirs qui résulteraient d'un apprentissage.

III.1.1.2 Caractérisation des concepts

Les concepts interviennent donc dès qu'il y a interprétation, explication et même parfois description de ce qui est perçu. Nous donnons ici quelques pistes théoriques qui éclairent ce que nous entendons par concept.

Weil-Barais (1993) distingue une conception empiriste des concepts et une conception rationaliste. La première estime qu'il y a concept dès qu'il y a repérage d'attributs invariants, ainsi former ces concepts revient à extraire/identifier ces invariants. Les concepts sont alors définis par une collection d'objets représentatifs ou par la liste des attributs qui le caractérisent. On pourra ainsi dans cette perspective parler du concept de table en y associant par exemple les attributs *plan horizontal* et *au-dessus du sol*. Ce point de vue, proche de celui de la psychologie, s'oppose au point de vue rationaliste qui voit le concept comme une entité mentale élaborée en vue de pouvoir expliquer et interagir. Ce point de vue est utile dès qu'on cesse de s'intéresser à des concepts catégoriels, définis par leurs invariants, et qu'on prend en compte les concepts relationnels qu'on rencontre en science. Ces concepts ne prennent sens que dans leur relation à d'autres grandeurs physiques. La référence aux objets devient dans ces conditions bien plus complexe et l'approche empiriste ne suffit plus pour définir et caractériser les concepts. Weil-Barais donne comme exemple de concept relationnel l'énergie, concept utile pour la description et l'interprétation de phénomènes très différents, en relation avec des grandeurs physiques très diverses. Cette opposition entre

empirique et rationnel se retrouve plus ou moins fidèlement dans d'autres types de caractérisations des modèles. L'épistémologue Cassirer (1910) distinguait déjà dans le même ordre d'idée les concepts catégoriels et les concepts relationnels. Reif et Allen, cités par Tiberghien (1999), distinguent en physique les concepts "les plus simples" et les concepts aux propriétés plus complexes. Les premiers réfèrent à une entité particulière (particule, triangle, objet visible), les deuxièmes s'apparentent plutôt aux concepts relationnels puisqu'il est possible de les associer à des grandeurs mesurables. On peut lire aussi la distinction entre concepts catégoriels et relationnels dans la séparation que fait Vygotski (1934) entre concepts quotidiens, qui se rapprocheraient du point de vue empirique ou catégoriel, et concepts scientifiques, plus proches du point de vue rationaliste ou relationnel. Pour tenter de donner une définition qui conviendrait pour les différents points de vue, il nous paraît intéressant d'utiliser le point de vue de Vergnaud (1991) qui définit lui le concept comme un triplet de trois ensembles :

· l'ensemble des situations de référence qui donnent du sens au concept ;

· l'ensemble des invariants opératoires qui sont constitutifs du concept (le plan du signifié) ;

· l'ensemble des signifiants (systèmes symboliques) qui permettent de symboliser le concept ainsi que ses propriétés et les situations qu'il permet de traiter (le plan du signifiant).

Entre le point de vue de la psychologie qui a adopté une acception assez large des concepts (des entités très variées peuvent être concepts) et la didactique de la physique qui tend à considérer qu'un concept est forcément un concept de la physique, nous tentons ici de trouver une voie intermédiaire. Puisque nous considérons que toute explication, même quotidienne, implique le recours à des concepts, nous proposons de caractériser les concepts de la physique d'une part, les concepts spontanés ou quotidiens d'autre part.

III.1.1.3 Analyse comparée des concepts et des explications mises en oeuvre en physique et dans la vie quotidienne.

· Concepts dans la vie quotidienne et en physique En adoptant une définition assez large du concept, par exemple celle de Vergnaud ci-dessus, nous pouvons alors tenter de caractériser les concepts utilisés dans la vie quotidienne et ceux utilisés par la physique. En ayant conscience qu'il n'y a pas une frontière stricte et bien délimitée entre les deux types de concepts, nous considérons que cette distinction correspond globalement à celle que Vygotski fait entre concepts quotidiens et concepts scientifiques. Commençons par dire à la suite de Vygotski (1934) qu'une différence majeure entre concepts quotidiens et concepts scientifiques réside dans leur mode de développement et d'élaboration. En particulier, les concepts quotidiens, à l'inverse des

concepts scientifiques, ne font pas l'objet d'un enseignement spécifique. De plus, les concepts quotidiens et les concepts scientifiques *"ont des côtés faibles et des côtés forts différents"*. Chez l'enfant Vygotski repère comme manifestation de la faiblesse des concepts quotidiens l'incapacité à l'abstraction et une inaptitude au maniement volontaire alors que la faiblesse des concepts scientifiques réside essentiellement dans leur verbalisme, leur insuffisante saturation en concret (p. 275). Dans la vie quotidienne et pour l'enfant, la distance entre perception et concepts serait ainsi moins grande que dans le cas de la physique, même si le physicien imbrique aussi ses perceptions et les concepts qu'il utilise. Vygotsky précise également un fait qui avait aussi été pointé par Piaget : l'usage des concepts quotidiens est généralement, et en tous les cas pour l'enfant, non conscient. L'enfant est capable d'utiliser, de comprendre des causes et des relations simples mais n'a pas conscience de sa compréhension. La chose est tout à fait différente pour les concepts scientifiques qui sont introduits généralement dans le cadre scolaire, en tant que concepts, par leur définition par exemple. La plupart du temps, la verbalisation du concept scientifique précède son utilisation. Claparède, cité par Vygotski (1934), a tenté de formaliser cette idée par la "loi de prise de conscience" qui indique que plus nous nous servons d'une loi moins nous en avons conscience. Le langage joue un rôle majeur dans le processus de prise de conscience de l'utilisation de concepts. Signalons également que, comme l'avait déjà mentionné Piaget, la prise de conscience nécessite l'intégration du concept dans un système, c'est-à-dire que des relations doivent être faites avec d'autres concepts. Il est donc raisonnable de considérer, pour poursuivre dans cette séparation dialectique entre types de concepts, que la plupart des concepts quotidiens, utilisés dans la vie de tous les jours, sont des concepts plutôt catégoriels alors que les concepts scientifiques seraient plutôt relationnels¹⁶. Cette séparation forcément réductrice de la diversité des concepts pourrait paraître inopérante si nous ne mentionnions pas le fait que le concept ne peut pas être identifié au terme utilisé. Un même mot peut désigner à la fois un concept catégoriel ou quotidien et un concept relationnel. Le terme *vitesse* est un bon exemple, mais également, dans le contenu d'enseignement que nous étudions, le terme *vibration*. Gentilhomme (1994) étudie pour préciser ceci la distinction entre notion (facette quotidienne du concept) et concept (facette scientifique du concept). Il définit en effet le concept comme un **"contenu informationnel entièrement déterminé par sa définition. Le contexte sélectionne un concept parmi plusieurs susceptibles d'être véhiculés par un même signifiant"**. La notion, quant à elle, n'exige pas la même rigueur. Elle est le résultat de la flexibilité du contenu, obtenue par métaphore ou métonymie. Son remplacement par un synonyme n'altère en rien la signification. Ainsi la notion d'intensité permet d'identifier quelques invariants éventuels, sa signification, hors contexte, est relativement floue et flexible. C'est dans la production langagière ou formelle, dans tous les cas contextualisée, que l'*intensité* acquiert un statut de concept (scientifique), puisqu'on pourra alors parler d'intensité électrique, acoustique, d'intensité des marées, etc. En physique, les concepts (le plus souvent relationnels donc) sont impliqués généralement dans un réseau conceptuel, ils induisent la plupart du temps un

¹⁶ Il est bien évident cependant qu'avant d'être intégré à un réseau conceptuel, les concepts du physicien ont pu être d'abord catégoriels ; c'est le cas par exemple des concepts primitifs d'une théorie.

langage formel et sont utilisés et utilisables dans un contexte théorique précis. Ils bénéficient de plus d'un ensemble de signifiants, pour reprendre le terme de Vergnaud, bien plus grand que celui des concepts quotidiens. On peut représenter un concept scientifique dans différents registres sémiotiques (Duval, 1995). A la suite d'autres auteurs (Duval, 1995 ; Ainsworth et al., 1996), nous estimons que l'articulation des différentes représentations est non seulement nécessaire mais favorise également la compréhension d'un concept scientifique. Ce rapide panorama permet donc de distinguer des différences majeures entre les concepts spontanés, quotidiens (ou encore les *notions*) et les concepts scientifiques, plus relationnels.

Explications dans la vie quotidienne et en physique Nous traitons ici des explications fournies au sujet du monde sensible, composé des objets et des événements observables. Du fait de la variété des types d'explications formulées dans la vie quotidienne il est relativement difficile de fournir des traits communs à ces explications. La nature de ce qui est reconnu comme explicatif peut en effet fortement varier : il peut s'agir d'une redescription simple de ce qui est à expliquer (paraphrase, reformulation...), de croyances d'ordre mythique ou religieux, de la désignation d'une cause matérielle ou finaliste mais également dans certains cas d'un effet à venir ou concomitant. Cependant on peut relever quelques traits communs à tous ces types d'explications. D'abord, il n'est pas surprenant de constater que les explications quotidiennes sont formulées le plus souvent et majoritairement avec des concepts quotidiens. Les notions (au sens de Gentilhomme) déploient alors toute l'efficacité liée à leur flexibilité et souplesse de sens (par exemple, comme on le verra, la notion de vibration est utilisée par les élèves dans des sens assez différents, pour expliquer des situations assez variées). Au regard de ce qui vient d'être dit dans le paragraphe précédent, il est donc normal que les mécanismes de l'explication ne soient pas conscients (par exemple l'usage de telle ou telle causalité, de telle ou telle théorie spontanée ne se fait pas consciemment) et que les registres sémiotiques utilisés pour formuler l'explication soient souvent limités au langage naturel. Les recherches en didactique au sujet des conceptions des élèves avant enseignement ont permis de montrer également que le recours au raisonnement linéaire causal est fréquent dans les explications, et ceci dans des domaines différents de la physique (Closset, 1983 ; Viennot, 1993 ; Maurines, 1986 ; Rozier, 1988). Ce type d'explication invoque un agent causal unique qui précède l'effet. La relation de causalité n'est effectuée qu'entre deux paramètres mais en aucun cas avec une approche systémique. Ce raisonnement pose bien évidemment de nombreux problèmes pour l'apprentissage de la physique, mais sa prégnance, quel que soit le domaine abordé, est probablement expliquée par la capacité qu'il a à résoudre ou interpréter bon nombre de problèmes rencontrés dans la vie quotidienne et à fournir des solutions acceptables (du point de vue de l'enseignant et /ou du point de vue de l'élève) à de nombreux problèmes proposés dans l'enseignement (Johsua et Dupin, 1989). Il est probablement plus facile de caractériser et d'étudier les processus explicatifs et les types d'explications adoptés en physique, en particulier grâce aux nombreux travaux d'épistémologie à ce sujet. Ceci tient probablement au fait que l'explicitation et les mises en relation des concepts en jeu sont le plus souvent observables directement à partir de la pratique du physicien ou de ses productions, alors qu'elles sont d'une part à découvrir

d'autre part moins structurées pour les explications de la vie quotidienne. Les explications causales sont par exemple bien plus complexes dans le cas de la physique mais finalement mieux connues que celles mises en oeuvre par les élèves. Nous ne revenons pas ici sur les caractéristiques des concepts scientifiques qui vont intervenir dans les explications fournies par la physique. C'est d'ailleurs de la nécessité d'explication d'ordre théorique que naissent les concepts de la physique, qu'ils soient importés d'une autre discipline ou spécifiquement créés. Nous nous arrêtons ici uniquement sur les types de causalités mises en oeuvre, en comparaison de la causalité linéaire causale mise en pratique inconsciemment dans le domaine quotidien. Si cette causalité "simple" est également utilisée en physique, ce n'est pas la seule. Dans un ouvrage collectif consacré à ce sujet, le physicien et épistémologue Halbwachs (1971) dresse une typologie de la causalité en physique. D'après lui, les physiciens ne construisent un modèle supérieur que s'il permet d'*expliquer* (c'est lui qui souligne) certains rapports réels dans le monde des objets et des événements, que le modèle inférieur était seulement capable de poser ou de décrire. Il précise alors qu'une théorie nouvelle **"constitue une explication soit lorsqu'elle fait apparaître un rapport nouveau entre des domaines de faits qui étaient conçus auparavant comme qualitativement différents, soit lorsqu'elle permet de prédire des faits qualitativement nouveaux"** (p. 41). Signalons à ce stade que la nature de ce qui est à expliquer par la physique ou dans la vie quotidienne peut varier. Certains faits de la vie quotidienne ne sont pas explicables en l'état par la physique qui en isolera certaines caractéristiques ou les simplifiera. Il y a ainsi dans certains cas une reconstruction par la physique du réel à expliquer. Halbwachs distingue trois types d'explications dont se satisfont les physiciens. Il utilise pour ceci la notion de *système physique*, défini comme **un "ensemble d'objets ou de grandeurs, ou d'une certaine quantité de "substance", que nous savons isoler par la pensée et distinguer sans équivoque du reste du monde physique"** (p. 42). Les trois catégories sont :

—

explication homogène ou formelle : elle ne fait pas appel à ce qui est extérieur au système, ni à d'autres variables que celles par lequel le système a été caractérisé ; il reconnaît lui-même que cette explication s'apparente davantage à une description mais qu'elle peut revêtir un caractère explicatif au sens donné ci-dessus ; ce type d'explication fournit davantage une *raison*, en donnant moins une cause qu'une description opératoire (en invoquant par exemple des éléments d'ordre théorique comme le principe de conservation de l'énergie ;

—

explication hétérogène, causale : dans le cas où la raison d'être des changements du système doit être cherchée hors du système, prenant généralement la forme d'un agent causal bien déterminé ; la causalité linéaire fait partie de cette catégorie ;

—

explication bathyène : ce type d'explication est très spécifique à la physique puisqu'il s'agit de changer de niveau de description et d'utiliser de nouvelles variables (il s'agit par exemple d'expliquer un phénomène macroscopique à l'aide d'un point de vue microscopique).

Halbwachs souligne qu'il est possible de percevoir chronologiquement ces trois types d'explications au cours du développement de l'enfant, à partir des expériences réalisées par Piaget. Il nous paraît en effet pertinent et constructif de tenter de faire un parallèle entre l'explication scientifique et la compréhension psychologique, en considérant comme Halbwachs **"qu'expliquer, au plan épistémique, c'est comprendre au plan psychologique"** (p. 49).

III.1.2 Structures des connaissances chez les apprenants et changement conceptuel

III.1.2.1 Quelques précisions

Les travaux de recherche en psychologie ou en didactique permettent de penser raisonnablement que les élèves abordent les problèmes scientifiques et plus généralement toute situation-problème à l'aide de ce qu'on pourrait appeler des théories plus ou moins construites et précises. Dans certains cas, ces théories revêtent une cohérence interne forte, quitte à subir quelques modifications ad-hoc. Il n'est pas question ici de décrire des conceptions figées et fixées une bonne fois pour toute à un niveau de développement donné. C'est au contraire dans leur capacité à évoluer et à s'adapter aux nouvelles situations que certaines conceptions acquièrent cette capacité à coexister à côté du savoir scolaire, et par suite à "résister" à l'enseignement (Johsua & Dupin, 1993, p. 127).

Nous nous proposons dans ce paragraphe de décrire les tentatives pour identifier et caractériser ces théories "naïves" (au sens où elles précèdent l'apprentissage). Plus largement nous proposons différents courants de pensée qui tentent de percer l'organisation des structures conceptuelles et des connaissances naïves relatives à l'interprétation et la description des objets et des événements. La plupart de ces courants de pensées s'inscrivent dans ce qu'il est courant d'appeler (en particulier dans la littérature internationale) le changement conceptuel (*conceptual change*). Nous ne passons pas en revue la diversité des travaux à ce sujet mais nous nous bornons à ceux qui se sont intéressés de près à l'apprentissage de la physique.

Il ne s'agit pas ici de détailler les méthodologies mises en oeuvre pour produire ces résultats. Les outils utilisés sont relativement classiques lorsqu'il s'agit de révéler les connaissances des sujets : interviews, questionnaires avec ou sans matériel expérimental. Nous n'insistons pas non plus sur les différentes dénominations qu'il est possible de rencontrer dans la littérature : raisonnement commun, conceptions, connaissances naïves ou spontanées, structure conceptuelle... Sans oublier que le choix de tel ou tel terme n'est pas anodin¹⁷, nous considérons pour notre part que nous traitons ici de façon générale des connaissances des sujets étudiés, avant enseignement sur le domaine concerné (ou plus largement avant un enseignement scientifique) et des caractéristiques de ces connaissances. Il est bien entendu que ces structures et ces

¹⁷ le terme anglo-saxon de *misconception* stigmatise par exemple les écarts et les connaissances "fausses" par rapport aux savoirs canoniques (reconnus comme à apprendre), il induit ainsi une connotation négative.

connaissances sont révélées dans des situations toujours particulières et c'est la reproductibilité des conclusions quelle que soit la situation et le sujet qui est encore aujourd'hui à valider. Enfin, les recherches ne s'intéressent pas toujours à des enfants ou des adolescents du même âge, ce qui peut induire dans certains cas des contrastes forts dans les conclusions théoriques formulées.

Pour chaque point de vue, nous donnons d'abord des descriptions relativement statiques des structures et des caractéristiques des connaissances et des invariants qu'on peut y repérer. Ces structures ont souvent été élaborées grâce à des observations évolutives et pensées pour permettre une analyse des difficultés à apprendre la physique ou des mécanismes cognitifs qui accompagnent cet apprentissage. Nous tentons donc de donner ensuite les quelques points de vue théoriques sur les mécanismes d'évolution des connaissances pour chaque auteur (§ III.1.2.5).

III.1.2.2 Les connaissances en miettes de diSessa

diSessa (1983, 1988) a mené d'importantes recherches en didactique au sujet de la physique naïve (*folk physics*). Il insiste sur la très grande diversité des structures de connaissances à prendre en compte, pense que la physique intuitive consiste à utiliser un grand nombre de petits fragments de connaissances plutôt qu'un petit nombre de structures théoriques. Il cherche à comprendre la nature ces éléments de connaissances les plus petits. Il appelle ces "briques de base", ces miettes de connaissance des "p-prims" (*phenomenologic primitives*) et les définit comme des interprétations superficielles et auto-explicatives de la réalité physique : par exemple il n'y a pas à expliquer pourquoi l'effet est d'autant plus grand qu'on exerce un effort plus important sur un objet. Les p-prims ont un caractère phénoménologique du fait qu'elles se construisent dans l'observation des phénomènes (elles sont en quelque sorte des abstractions minimales de phénomènes simples de la vie quotidienne) et un caractère "primitif" dans la mesure où elles sont évidentes en soi, ne nécessitent aucune justification en étant prises comme point de départ (1988, p.4). Les p-prims ne sont pas vraiment structurées et elles n'ont pas de cohérence générale entre elles. Elles n'ont pas forcément de portée générale mais sont appelées en fonction de la situation proposée. La désignation d'une p-prim par un nom n'est pas toujours facile, car elles s'expriment davantage dans l'observation ou le comportement (c'est le seul moyen de les mettre en évidence). diSessa donne l'exemple de ce qu'il appelle *the Ohm's p-prim* qui consiste à considérer qu'un impetus agit *via* quelque chose qui résiste (la résistance étant plus ou moins grande) pour donner un résultat d'autant plus important que l'impetus est grand et la résistance faible. Il donne aussi une p-prim qui peut s'appliquer au son (c'est lui qui le dit) ou au mouvement et qu'il appelle "disparaître au loin" (*dying away*) : au fur et à mesure de son avancement, le phénomène diminue et finit par disparaître. La question du regroupement et de l'organisation de ces connaissances "en miettes" se pose alors. diSessa considère que pour le physicien on peut dégager trois structures : les concepts, les croyances puis les théories (dans cet ordre hiérarchique). Les p-prims sont des unités de connaissances bien plus petites que les concepts. Il est alors difficile de dégager une hiérarchie des structures conceptuelles chez l'élève. Les modèles mentaux sont un essai de regroupement de quelques p-prims qui seraient sélectionnés en référence à une situation donnée. Mais

globalement, diSessa ne dégage pas vraiment d'ordre hiérarchique dans l'organisation des connaissances spontanées. Il reste également à déterminer une stratégie efficace pour identifier les p-prims, qui par leur nature même, sont *a priori* extrêmement nombreux. Cependant cette approche bien plus phénoménologique que conceptuelle est séduisante pour un sujet comme le son et nous attachons une importance toute particulière à l'hypothèse de diSessa qui consiste à penser que la science ne peut pas faire l'économie de l'expression d'une phénoménologie claire (diSessa, 1983, p. 16).

III.1.2.3 Les catégories ontologiques de Chi

Les psychologues Chi et, dans le domaine de la biologie, Keil s'intéressent à la connaissance ontologique (Chi et al., 1994) : pour eux, toute entité du monde appartient à une catégorie ontologique particulière, que ce soit du côté des connaissances quotidiennes que de celui des connaissances scientifiques. Ils proposent un arbre structuré de catégories ontologiques dont le premier niveau possède par exemple trois catégories : la matière (les objets), les processus et les états mentaux. La catégorie *matière* est ensuite divisée en *chose naturelle* et *chose artificielle*, les choses naturelles peuvent à nouveau être catégorisées (vivantes / non vivantes), etc. A chaque catégorie correspond une liste d'attributs que le concept doit posséder pour entrer dans la catégorie. Dans cette approche conceptuelle (ce sont bien des concepts qui sont affectés dans les catégories, les connaissances sont ici réduites au concept et à leur affectation dans une catégorie), les conceptions erronées et les difficultés d'apprentissage de la physique seraient le résultat d'un décalage ou d'une incompatibilité entre la catégorie ontologique que la science attribue au concept et celle que le sujet lui assigne effectivement. Les exemples choisis dans le domaine de la physique sont assez nombreux : la force, le courant électrique, la lumière seraient considérés comme faisant partie de la catégorie "matière" alors que la physique les considère comme des processus.

Le cas du son est à ce sujet tout à fait intéressant. Nous avons vu dans le chapitre I la diversité des points de vue possibles sur la nature de la notion de son (au sens de Gentilhomme toujours). La physique a tendance à privilégier l'aspect *processus* mais accepte différentes possibilités dans cette catégorie (événement mais aussi interaction basée sur la contrainte par exemple). Le son peut aussi être considéré, dans son acception perceptive, comme un état mental. Aux différentes facettes du concept "son" (chapitre I) correspondrait donc différentes catégories ontologiques. Comme l'articulation de ces différentes facettes va probablement poser des problèmes dans l'enseignement et l'apprentissage de connaissances scientifiques à ce sujet, ceci tendrait à confirmer l'interprétation des difficultés que fait Chi en invoquant le changement de catégorie ontologique.

Par contre, l'analyse de Chi à ce sujet semble insuffisante pour décrire ce qui constitue le cœur de certaines connaissances, à savoir les liens à établir entre différents concepts. La connaissance consiste souvent à faire des liens entre concepts et l'apprentissage ne nous semble pas seulement consister à attribuer une catégorie à chaque concept. Il n'y a pas vraiment de place dans cette catégorisation pour les réseaux de concepts. On voit bien également que l'affectation et le découpage à partir d'un mot ne

tient pas très longtemps, un mot pouvant donner lieu à plusieurs concepts scientifiques qui n'appartiennent pas forcément à la même catégorie.

Par rapport au point de vue de diSessa, il semble que l'hypothèse de cohérence des connaissances soit ici beaucoup plus forte. Une autre divergence importante, comme le remarque Karine Mazens (1999), réside dans le fait que l'inné occupe une place très importante dans la catégorisation ontologique alors que diSessa donne un rôle central à l'expérience sensible et à la phénoménologie. On pourrait dire dans ces conditions que diSessa est très situationniste. Une voie intermédiaire sur ce sujet serait celle proposée par Carey et Vosniadou.

III.1.2.4 La hiérarchie des structures de connaissances selon Vosniadou

Dans ses recherches en psychologie, Stella Vosniadou s'est intéressée à la structure des connaissances naïves en physique et aux modifications de cette structure au cours de l'apprentissage. Carey (1985) a une approche similaire sur des sujets qui concernent davantage la biologie.

Pour Vosniadou (1994), s'il existe très tôt des théories naïves fortes, elles sont largement influencées par l'expérience. De la même façon qu'il est possible en science de distinguer des théories "cadres" (principes généraux, présupposés, causalités, principes logiques) et des théories plus spécifiques à un domaine donné, Vosniadou considère que les connaissances naïves sont cohérentes et structurées très tôt en *framework theories* et *specific theories*.

Les "cadres théoriques" sont constitués de l'ensemble des présuppositions ontologiques et épistémologiques, bien enracinées, qui contraignent l'apprentissage. Ce qui s'en rapprocherait le plus pour la science serait la notion de paradigme. Pour Vosniadou les éléments des cadres théoriques sont des systèmes d'explication relativement cohérents basés sur l'expérience quotidienne et confirmés depuis des années (Vosniadou, 1994, p. 49), ils conditionnent l'interprétation du monde et les productions des élèves, et ils sont assez stables. Tout ceci leur procure quelques caractères communs avec les p-prims de diSessa même si Vosniadou elle-même ne les situe pas dans ces cadres théoriques. L'affectation de certains concepts dans des catégories ontologiques (Chi) peut par contre faire partie de ces cadres théoriques.

Les "théories spécifiques" sont soumises aux contraintes fixées par les cadres théoriques. Elles sont constituées de **"propositions reliées entre elles ou de croyances qui décrivent les propriétés et le comportement des objets physiques"** (p. 47). Elles sont construites à partir de l'observation (ce qui les rapproche également des p-prims de diSessa que Vosniadou compare aux croyances) et sont généralement déterminées pour un domaine donné de la physique. Par exemple, la croyance selon laquelle la chaleur peut aller par contact d'un objet à un autre plus froid est contrainte par la présupposition qui fait de la chaleur une substance. Vosniadou mentionne comme différence essentielle entre croyances et p-prims le fait que les croyances sont liées et contraintes par des présuppositions ontologiques et épistémologiques en formant ainsi, contrairement aux connaissances "en miettes" de diSessa, une structure cohérente (p.64).

A un niveau inférieur, Vosniadou parle de modèles mentaux (*mental models*). Cette

notion relativement classique en psychologie est une sorte de représentation mentale des objets et des événements qui serait produite dans chaque situation de résolution de problèmes. Ces représentations seraient finalement des instanciations des théories spécifiques, créées sur-le-champ ("on the spot") ou rappelée à partir de la mémoire à long terme pour des modèles qui auraient déjà été construits pour d'autres situations. Le modèle est donc éphémère, très lié à la situation et appelé à évoluer fortement. Pour Vosniadou, les modèles mentaux sont la voie d'entrée par laquelle on peut espérer mieux connaître les structures de connaissances qui les ont générés. Pour ceci, et nous reprendrons cette méthodologie à notre compte, il faut révéler les modèles mentaux par des questions "génératives" qui n'ont donné lieu à aucun enseignement préalable (*"understanding the generic mental models individuals use to answer a variety of different questions related to a given concept can provide important information regarding the framework theories and specific theories"*, p. 48).

III.1.2.5 Le changement conceptuel

Comme nous l'avons dit dans le préambule de ce paragraphe, les courants de pensée exposés s'inscrivent dans le cadre du changement conceptuel (*conceptual change*). Ce qui est en question pour ces auteurs est en effet l'évolution de structures de connaissances au cours de l'apprentissage. Les structures dégagées l'ont été pour mieux étudier leur modification que ce soit au cours du développement cognitif ou au cours de l'apprentissage (sans qu'on puisse toujours séparer les deux causes).

Nous ne passerons pas en revue tous les points de vue sur les changements conceptuels, suffisamment nombreux pour donner lieu maintenant à des analyses comparées (Tytler, 1998). Nous ne nous placerons pas dans le cadre d'un parallèle strict entre changement conceptuel et révolution scientifique (Kuhn, 1970), comme ont pu le faire certains (Postner et al. (1982)).

Il est maintenant largement reconnu que certaines conceptions sont plus stables que d'autres et que certains apprentissages sont plus difficiles que d'autres. De même, il est admis dans une certaine mesure que les structures de connaissances ont une cohérence interne parfois excellente (Driver, 1981 ; McCloskey, 1983). Les outils de description de la structure des connaissances et les différents points de vue sur le changement conceptuel doivent permettre d'expliquer, au moins en partie, ces phénomènes. La nature du changement conceptuel diffère énormément selon le point de vue théorique adopté.

Pour diSessa, il est difficile d'avoir un point de vue clair sur le changement conceptuel puisque ses propositions ne sont pas centrées sur les concepts en tant que tels. On peut dire globalement que l'apprentissage consiste en une réorganisation des p-prims et en une augmentation de leur cohérence interne. Au cours de l'apprentissage les p-prims peuvent aussi permettre l'élaboration de briques de connaissances plus grosses en cessant de devenir auto-explicatives et en étant rattachées à des structures de connaissances plus large. Pour Chi, le changement conceptuel a lieu lorsqu'il y a changement d'un concept d'une catégorie à une autre, sans nier que certains apprentissages ne consistent pas forcément à changer un concept de catégorie mais en des modifications intermédiaires ou d'un autre ordre (modifier des relations causales entre concepts par exemple). Ce point de vue ne permet cependant pas d'expliquer pourquoi

certaines changements conceptuels sont plus difficiles que d'autres. Enfin, Vosniadou interprète le changement conceptuel par une modification d'abord au niveau des modèles mentaux (*"the mental models are the points at which new information is incorporated into the knowledge base"*, p. 48), celle-ci pouvant avoir des conséquences sur les croyances, voire même sur le cadres théoriques, qui sont pourtant les plus stables et les plus "résistants". Ceci permet donc d'interpréter le fait que certains apprentissages sont plus difficiles que d'autres : tout dépend du niveau qu'il faut modifier. Par exemple, lorsque l'information nouvelle est cohérente avec les connaissances en place, cette évolution est facile (il y a alors enrichissement de la structure conceptuelle par simple *accrétion*) alors qu'elle est plus difficile lorsqu'elle ne paraît pas en **accord "avec les croyances, les présuppositions ou la structure relationnelle d'une théorie"** (p.49) : il faut alors qu'il y ait *révision*, celle-ci étant plus facile au niveau des théories spécifiques que des cadres théoriques. Dans tous les cas, le changement conceptuel est graduel et requiert un temps important. Pour Vosniadou, le savoir du novice est rattaché à des présuppositions d'ordre ontologique et épistémologique (dont il n'a pas conscience) alors que celui du de l'expert l'est à des lois et théories (dont il a conscience), ce qui produit des systèmes explicatifs très différents.

Ces travaux de psychologie ou de didactique sur le changement conceptuel sont donc des moyens de caractériser ou d'étudier l'apprentissage et les conditions favorables à sa réalisation. Nous retiendrons de cette revue bibliographique les différentes approches dont nous exploiterons tout ou partie des réflexions selon ce qui nous paraît pertinent :

- l'approche phénoménologique de diSessa à prendre en compte (même si elle ne décrit pas de théories naïves et ne fournit pas un cadre d'étude théorique) ; nous nous poserons ainsi la question de ces "briques de savoirs" qui ne nécessitent pas d'explication puisqu'auto-suffisantes pour expliquer des situations quotidiennes ;

- la prise de conscience que certains concepts doivent changer de catégories ontologiques au cours d'un apprentissage scientifique ;

- la hiérarchie et la structuration des connaissances de Vosniadou et Carey pour leur capacité à rendre compte de processus d'apprentissage et des difficultés variables de ces apprentissages, ainsi que des différences de structures conceptuelles entre "novices" et "experts".

C'est finalement le cadre théorique élaboré par Vosniadou qui nous paraît le plus complet et efficace pour tenter d'étudier les structures de connaissances sur un domaine donné de la physique.

Nous tentons dans ce qui suit de contextualiser ces repères théoriques au regard des conceptions mises en évidence au sujet du son et nous reviendrons sur ces éléments théoriques lors de la présentation de notre expérimentation sur les systèmes explicatifs (Partie C).

III.2 Revue des travaux sur les conceptions des enfants

III.2.1 Une brève étude de Piaget

Il y a peu de sujets de physique élémentaire qui n'aient été abordés par Piaget. Le rapport des enfants au son est abordé dans un court passage de l'ouvrage *Les explications causales* (1971, pp. 105-111). En fait Piaget, s'intéresse au son dans le rapport que les enfants lui font entretenir avec l'air. Si le son occupe dans l'oeuvre de Piaget une place moins importante que d'autres phénomènes physiques, ceci peut s'expliquer par le fait qu'il pense que **"la transmission du son soulève bien moins de difficultés que celles de la lumière et de la chaleur"**. Au cours du développement de l'enfant, Piaget décrit les conceptions suivantes :

- le son ne va pas de l'objet émetteur à l'oreille (stade IA) ;

- le son va de l'objet à l'oreille puis revient à l'objet (stade IB) ;

- le son part en lignes droites dans toutes les directions (stade II) ;

- le son est un "tapotement" qui "résonne" qui se répand par l'intermédiaire de l'air ou qui est l'air (à partir de ce stade, Piaget donne moins de précision sur les conceptions).

Piaget affirme qu'il s'établit très tôt un lien entre la parole et l'air (parce qu'on souffle avec la bouche) et invoque une conduite (la parole) bien plus précocement socialisée que la vision, par exemple, pour justifier certaines conceptions précoces : c'est parce que le sujet constate très tôt une communication continue entre les diverses sources de son qu'il pense que les sons subsistent dans les objets (comme la pensée subsiste dans l'être qui parle) puis ne font que l'aller-retour avec les oreilles.

III.2.2 Les travaux de Karine Mazens

Dans sa thèse de psychologie, Karine Mazens (1999) s'intéresse au changement conceptuel chez l'enfant au sujet du son (et de la chaleur). Utilisant des éléments théoriques proches de ceux que nous venons d'exposer, elle cherche à repérer les conceptions naïves des enfants au sujet du son, à repérer les éventuelles structures de connaissances (modèles mentaux et cadre théorique par exemple), à mesurer le degré de cohérence des conceptions et enfin à étudier les changements conceptuels en jeu. Pour ceci elle mène essentiellement deux expériences en interrogeant 60 puis 89 élèves également répartis entre maternelle (Grande section, 6 ans), CE1 (8 ans) et CM1 (10 ans). Nous décrivons ci-après les résultats essentiels de ses travaux.

III.2.2.1 Nature du son et propriétés "matérielles" du son

Mazens propose différentes situations pour tester si les propriétés suivantes sont attribuées au son : substantialité (ou consistance), poids, permanence (ce sont des propriétés de la matière, catégorie ontologique principale de Chi). Il est entendu ici par permanence le fait que **"le son existerait encore après avoir été émis et qu'il se trouverait toujours quelque part"** (p.114). Ces trois propriétés de la matière sont effectivement attribuées au son, en particulier par les enfants les plus jeunes. Il y a un abandon progressif de ces propriétés au cours du développement des enfants mais ces évolutions ne sont pas forcément synchrones : les propriétés de poids et de permanence sont abandonnées avant la propriété de substantialité. Le concept de son ne semble donc pas réaffecté en bloc de la catégorie *matière* à la catégorie *processus* mais les changements sont progressifs. A partir des situations proposées aux enfants (quelques-unes pour chacune des propriétés), il n'est pas possible de dégager une cohérence forte entre les trois propriétés. De façon plus précise, l'attribution d'une propriété donnée au son (en particulier la substantialité) semble dépendre énormément de la situation proposée.

Au sujet de la substantialité, K. Mazens tente de dégager deux "théories naïves". La première est caractérisée par la croyance en la substantialité du fait analogies avec la matière. Ceci contraint les modèles mentaux suivants :

- . une substance peut passer à travers des trous, même petits ;

- . une substance dure peut traverser une substance molle.

La deuxième est basée sur une croyance en la substantialité cette fois largement aménagée. Cette "théorie naïve" peut se manifester par la mise en oeuvre de deux modèles mentaux :

- . la propriété d'invisibilité du son lui permet de passer à travers les murs (comme les fantômes par exemple, la nature du son étant mal définie mais différente de l'objet et de l'humain) ;

- . le son est décrit avec des termes qui lui sont spécifiques (*vibrer*, *résonner* par exemple).

Il semble que ces quatre modèles mentaux apparaissent au cours du développement de l'enfant dans l'ordre où nous les avons présentés. Remarquons que la propriété de substantialité est assez fortement ancrée puisqu'elle reste relativement importante même chez les élèves les moins jeunes (lors de la situation de perception auditive d'un réveil enfermé dans une boîte en fer, 80% des grandes sections se placent encore dans ce cadre après l'expérience, 30% des CM1). Certains de ces points de vue sont également rencontrés dans d'autres recherches avec des enfants (en particulier Asoko et al., 1991 et 1992).

La propriété de permanence est elle aussi fortement attribuée au son (entre 60% et

80% des réponses), ceci quelle que soit l'émission sonore (boîte qui fait un bruit de vache, corde de guitare ou coup de poing sur la table). Les localisations du son après perception citées par les enfants sont les suivantes : surtout dans l'objet (en particulier pour la boîte et la table) et à l'extérieur (davantage pour la guitare et la table), un peu dans l'oreille et de façon rare dans le cerveau. En fait, si l'on demande à l'enfant jusqu'où va le son, en faisant effectivement un son, l'attribution de permanence chute énormément. Nous discutons pour notre part le lien fait ici entre permanence et matérialité. Il est possible que pour certains enfants, même jeunes, le son soit permanent au sens où il peut encore être dans la source qui peut toujours potentiellement faire un son ou bien parce qu'on l'a "en tête" ou "dans l'oreille", reflétant ainsi une mémoire auditive qui peut permettre de dire que le son existe encore : la permanence n'a pas forcément un support matériel.

III.2.2.2 Rôle de la vibration

K. Mazens s'intéresse dans un second temps au rôle attribué à la notion de vibration dans la production des sons. Ceci permet en particulier d'obtenir des informations supplémentaires au sujet d'une hypothétique évolution développementale de la catégorie *matière* vers la catégorie *processus*. Dans un premier temps c'est l'émetteur sonore qui constitue la variable des situations proposées. La corde de guitare (dont on fait constater la vibration) est-elle responsable du son ? La table sur laquelle on frappe pour émettre un bruit vibre-t-elle et est-ce le phénomène responsable du bruit ? Le mur sur lequel on frappe pour émettre un bruit vibre-t-il et est-ce le phénomène responsable du bruit ? Les trois-quarts des enfants pensent que la vibration de la corde est responsable du son et le même pourcentage pense que c'est par contre autre chose que la vibration ou le mouvement de la table qui est cause du bruit. La quasi-totalité pense même ainsi pour le mur. On constate une hiérarchie forte entre les situations. La vibration est invoquée le plus facilement pour la corde, puis pour la corde et la table, puis pour les trois situations (cas rares). Si elle l'est pour le mur, elle l'est pour les trois, si elle l'est pour la table alors elle l'est aussi pour la corde. Il est donc remarquable de constater que la vibration n'est pas jugée nécessaire à l'émission sonore. On peut s'accorder avec Mazens sur le fait que la vibration est plus facilement corrélée au son quand elle est visible (surtout dans la mesure où d'autres études confirment ceci (Asoko et al., 1991)) . Il nous paraît cependant important de signaler que les résultats présentés ici peuvent être largement influencés par le type de question (la question pour la corde est nettement différente des deux autres puisque, dans ce cas, on fait remarquer un événement avant de proposer de l'impliquer dans la cause du son). Il est dommage de n'avoir pas eu les résultats aux questions posées au sujet de l'existence de vibration pour la table et le mur. Notons enfin qu'il n'y a pas d'évolution des réponses au cours du développement, ce qui semble confirmé par les études de Asoko et al. (1991) qui ne constatent des évolutions significatives sur ce sujet qu'à partir de 10-11 ans.

III.2.2.3 Transmission et trajet des sons

La transmission du son dans l'eau n'apparaît qu'au cours du développement. Les justifications évoluent également d'un point de vue animiste (le son comme un poisson par exemple) ou matériel vers des conceptions qui renvoient à la substantialité (le son

traverse car l'eau c'est mou) ou à la présence de bulles d'air dans l'eau. L'air est jugé indispensable à la perception des sons pour plus de la moitié des enfants (quasiment pas de dépendance avec l'âge) mais les justifications sont extrêmement difficiles à formuler (le son est souvent assimilé à un vent ou même à l'air). Il est à noter que les conceptions sur la transmission des sons sont cohérentes avec la substantialité qui leur est attribuée (ça passe dans un solide s'il y a des trous ou si ce n'est pas trop mou, pas trop épais). Pour connaître les conceptions des élèves au sujet du trajet du son, il leur a été demandé de dessiner ce trajet. Les résultats, présentés dans le diagramme III.2-1 ne dépendent pas de l'objet émetteur.

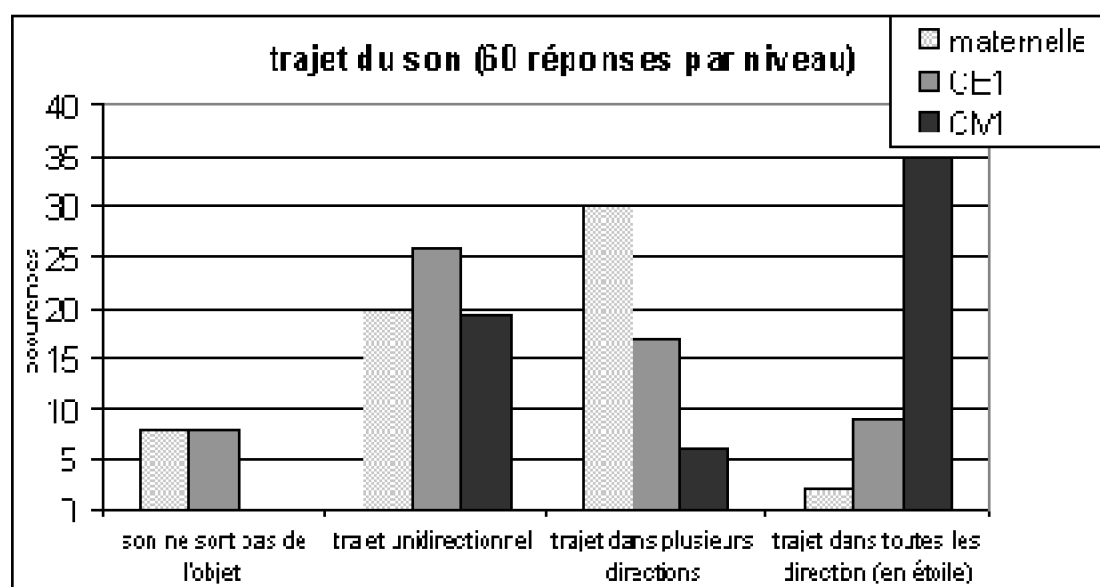


diagramme III.2-1 : trajet du son dessiné par les enfants (Mazens, 1999)

Enfin, dans sa deuxième expérience, K. Mazens met en évidence l'évolution de descriptions de trajets en directions des personnes (essentiellement par les élèves qui attribuent une substantialité au son) vers des descriptions ne privilégiant plus seulement les personnes.

Signalons également que ce travail a permis de corrélérer la capacité d'un matériau à isoler du son avec ses propriétés physiques. Il ressort ainsi que pour les enfants la perméabilité des matériaux au son est bien plus gouvernée par leur dureté et leur capacité à être pliés que par leur porosité et leur capacité à être cassés.

III.2.2.4 Les mots *vibrer* et *résonner*

K. Mazens s'est aperçue que certains enfants (parmi les plus vieux) utilisent spontanément les termes *vibrer* et *résonner* dans leurs explications sans être forcément capables d'en donner un sens précis. Dans un premier temps les enfants doivent mimer les deux verbes et expliquer leur mime. Cet exercice apparaît comme très difficile aux enfants. Il ressort cependant qu'à *résonner* sont attachées les idées de durée et de répétition du bruit, avec parfois une allusion mécanique (rebond). Le mot *vibrer* est relativement peu connu (surtout par les jeunes enfants) et lorsqu'il l'est, c'est surtout au

mouvement ou au tremblement qu'il est associé (un peu au bruit mais la question venait après des problèmes sur le bruit). Parmi 6 objets proposés pour montrer le mieux possible ce que c'est que *vibrer*, les choix des enfants sont les suivants (tableau III.2-1).

Tableau III.2-1 : objet choisi pour montrer ce qu'est *vibrer* (Mazens, 1999)

	CE1	CM1	Total
Corde de guitare	12	21	33
Diapason	0	2	2
Guimbarde	1	2	3
Feuille de papier	2	1	3
Feuille carton, règle en plastique	0	0	0
Total	15	26	41

Le choix d'objet dont la finalité est de produire des sons révèle la forte liaison spontanément établie entre le fait de vibrer et les deux traits caractéristiques "objet dont la finalité est sonore" et "objet pour lequel la vibration visible".

Notons que l'usage spontané et fréquent des termes *vibrer* et *résonner* a également été constaté dans les expériences préliminaires que nous avons pu mener en début de classe de seconde, parallèlement à ces travaux.

III.3 Revue des travaux sur les conceptions au niveau secondaire et universitaire

Nous nous sommes attardés dans le paragraphe précédent sur des travaux qui concernent des enfants, avant l'entrée dans le cycle secondaire français. Nous travaillerons pour notre part essentiellement avec des élèves du secondaire. Le travail de Mazens est cependant très utile d'une part pour les points de vue théorique et méthodologique qu'il adopte, d'autre part pour les idées qu'il fournit quant à une expérience sur la phénoménologie naïve d'élèves plus âgés au sujet du son. Nous reprendrons en effet à notre compte une telle approche phénoménologique qui se démarque (dans un premier temps et pour nourrir notre réflexion) des savoirs scolaires disciplinaires.

Il est également intéressant de connaître ce qui constitue en quelque sorte la genèse des conceptions qu'il est possible de mettre en évidence chez des sujets plus âgés. La comparaison avec les quelques études à ce sujet au niveau secondaire et universitaire peut en effet permettre de repérer quelques conceptions ou modèles mentaux assez résistants à l'enseignement scientifique en général et l'enseignement d'acoustique en particulier.

Nous exposons dans ce paragraphe les grandes tendances des conceptions mises en évidence à ces niveaux, réalisées davantage dans le cadre de la didactique des sciences que dans celui de la psychologie. Il s'agit finalement d'une revue bibliographique de différents documents de natures parfois bien différentes. À côté de publications

majeures ou de thèses qui abordent le sujet, nous mentionnerons aussi, quand cela sera pertinent, des mémoires de DEA ou des mémoires professionnels de 2^e année d'IUFM. Les stagiaires en fin de formation à l'IUFM ont en effet souvent pris pour sujet d'étude, ces dernières années, un domaine reconnu difficile à enseigner, par lequel ils étaient concernés puisqu'enseignant généralement en seconde dans le cadre de leur stage.

Nous commençons par les conceptions qui n'impliquent pas directement les concepts de la physique du son. Ces études ont essentiellement lieu au niveau secondaire. Nous finirons par un paragraphe sur l'influence de l'enseignement de physique sur les conceptions d'étudiants plus ou moins confirmés en physique.

III.3.1 Vitesse, déplacement, cinématique du son

III.3.1.1 Source et déplacement

En France, Laurence Maurines a été une des toutes premières à s'intéresser aux conceptions sur les phénomènes sonores (Maurines, 1992, 1993). Ceci faisait suite à des analyses sur les phénomènes ondulatoires mécaniques (propagation d'une impulsion mécanique sur une corde en particulier), qui semblent avoir par la suite fortement influencé ses recherches sur le son. La méthode utilisée est essentiellement le passage de questionnaire à des élèves de fin de collège ou début de lycée. Dans un premier temps, même si ceci ne respecte pas forcément l'ordre de ses recherches, elle a pu mettre en évidence, à partir de situations quotidiennes mais de questions déjà quelque peu formalisées dans leur présentation, **une corrélation assez forte entre le caractère "fort" du son émis et la vitesse** (elle adopte pour sa part le point de vue du physicien en disant "puissance de la source" mais nous préférons garder le terme "fort" car c'est celui utilisé dans les libellés de questions), entre **l'intensité du son et la vitesse** ainsi qu'entre **la portée et la vitesse**. Une proportion importante d'élèves pensent également que la vitesse diminue au cours du déplacement. Maurines interprète ces résultats dans un cadre similaire à celui utilisé pour les conceptions en mécanique (Maurines, 1986). La propagation du son serait gouvernée et pourrait être décrite par un concept hybride, un *capital* qui serait un mélange de force, d'intensité, d'énergie, de vitesse... Ce capital s'épuiserait au cours de la propagation et serait entièrement déterminé par une cause antérieure à la propagation (raisonnement linéaire causal), à savoir ici la façon dont le son est émis.

Maurines ajoute la hauteur aux nombreux paramètres qui sont associés à ce *capital* (même si la hauteur n'est pas utilisée en tant que telle par les élèves). Rivière (1994) met en effet en évidence une conception qui corrèle vitesse et caractère plus ou moins aigu (plus le son est aigu plus il va vite), ce qui peut s'expliquer en partie par le lien fait entre intensité et hauteur (Maurines, 1998).

Les premières expériences que nous avons menées en classe de seconde avant enseignement tendent à confirmer ces "fusions" entre paramètres (voir par exemple la figure III.3-1 ci-dessous). Les résultats présentés sur cette figure rendent compte des réponses écrites de 157 élèves de seconde avant enseignement. L'association plus fort – plus rapide (faite par environ un quart des élèves) semble plus fréquente que l'association

plus aigu – plus rapide (19% des élèves). Il faut également souligner le nombre important de réponses "je ne sais pas", comme d'ailleurs souvent dans les enquêtes que nous avons pu voir sur le son. Cette incapacité à répondre est bien plus importante quand le son est aigu (29%) que lorsqu'il est fort (10%). Ces relativement forts pourcentages de réponses donnent une idée de la difficulté, pour les novices, d'avoir un point de vue bien affirmé sur ce type de situations quotidiennes.

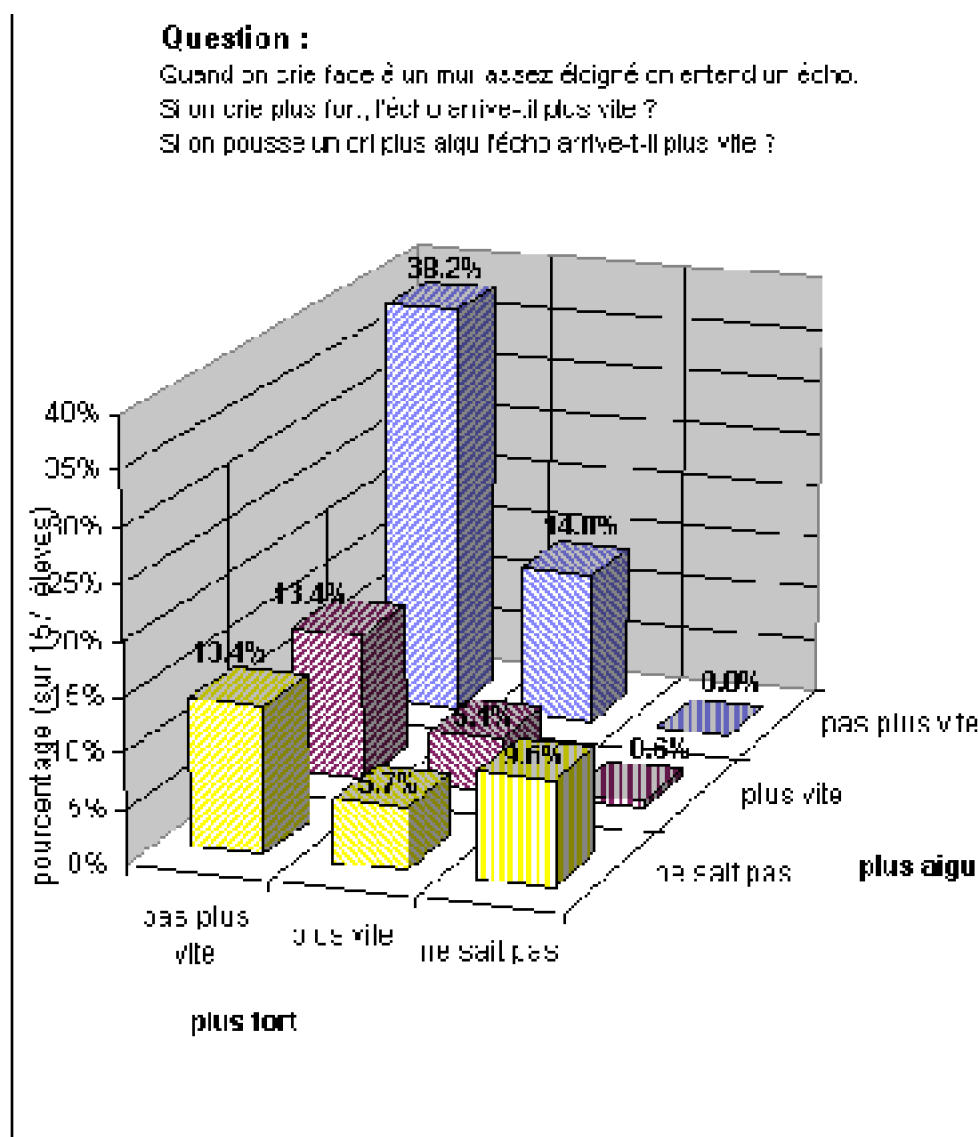


Figure III.3-1 : associations entre rapidité du son et caractère fort et aigu

III.3.1.2 Influence du milieu sur le déplacement du son

Dans un premier temps, c'est le rôle du milieu qui a été questionné par les chercheurs pour mieux connaître les conceptions sur ce qui, en dehors de la source, pourrait influencer la vitesse. Quasiment la moitié des élèves interrogés par Maurines estiment que le son peut se propager dans le vide (il reste à savoir ce que les élèves mettent conceptuellement derrière le mot *vide*). Il semble ensuite que **la possibilité de**

propagation soit jugée moins importante dans un liquide que dans l'air et encore moins dans un solide. Ceci est relativement cohérent avec un aspect matériel qui serait attribué au son et qui l'empêcherait de se déplacer dans des milieux de plus en plus "durs" ou "résistants". Linder (1993) constate également ce genre de raisonnement même chez des étudiants en physique et en particulier cette conceptualisation du son comme une chose ("**conceptualized as a physical thing**" (c'est lui qui souligne), p. 656). La vitesse du son dépendrait ainsi de la **résistance** que le milieu présente au déplacement et, plus précisément, de la densité (et par suite de la température) du milieu. Linder note également que cette représentation conduit les étudiants à penser que c'est dans le vide que la vitesse est la plus grande, ce qui déstabilise certains qui ont appris le contraire ! Il semble finalement que les théories naïves décrites par Mazens à propos de la nature matérielle du son soient des structures fortes et bien ancrées.

III.3.2 Nature du son et mécanisme de propagation

Nous venons déjà d'évoquer la tendance qu'ont les élèves à attribuer des caractéristiques matérielles au son, dont les raisonnements analogues à ceux rencontrés en mécanique sont par exemple un indice. Nous continuons ici à exposer les conceptions sur la nature du son. S'intéresser à la nature attribuée au son, c'est essentiellement observer les conceptions sur ce qui se déplace et sur la façon dont le son peut se propager (description et mécanisme de la propagation). Ces conceptions émergent assez difficilement, puisque les élèves, en particulier avant enseignement, ont du mal à conceptualiser cet aspect. Il semble aussi que les élèves ne se soient jamais posé la question auparavant. Au niveau qu'il étudie (l'équivalent du niveau secondaire français), Foley (1994, 1995) indique par exemple que les conceptions des étudiants sont purement expérimentales ou phénoménologiques : ils ont des idées sur la façon dont on peut créer les sons, sur les sons qu'ils entendent mais des idées très vagues sur la façon dont ça se propage. Nous interprétons ceci par l'évidence et la quotidienneté des phénomènes sonores. Cette prégnance des événements sonores réside dans la création et la perception quotidienne, clés de la communication verbale ou musicale et du repérage de la configuration spatiale permis par les perceptions auditives. De plus ces deux événements (émission et réception) sont la plupart du temps simultanés.

Il est donc assez difficile d'obtenir des réponses nombreuses sur le mécanisme de propagation avant enseignement. Quand cela arrive, ce sont surtout les aspects macroscopiques qui sont invoqués (cas des élèves du secondaire surtout). Les aspects microscopiques émergent généralement après enseignement, au niveau secondaire mais surtout au niveau universitaire. Quel que soit l'âge des sujets, il semble que *pour certaines situations*, le terme *vibration* soit souvent invoqué (même avant enseignement) sans définition précise (Derradj et al., 1994 ; Varaine et Treillard, 1998 ; Asoko et al. 1991), ce qui était déjà le cas pour les enfants.

III.3.2.1 Aspects macroscopiques

Maurines (1998) remarque au sujet de la propagation du son que le fait que l'eau soit relativement bien acceptée pour permettre le passage du son n'indique pas forcément que le son se propage dans le milieu, au sens où la physique l'entend. Certains élèves

indiquent en effet que l'eau permet la transmission du son parce qu'elle peut se déplacer dans son ensemble ou parce qu'elle contient du gaz (point de vue déjà rencontré chez les enfants). Dans le même ordre d'idée, pour les élèves, les solides permettent parfois le passage du son parce que le son se déplacerait à la surface du solide (sans y entrer pour autant).

Dans une contribution majeure à ce sujet, Linder et Erickson (1989) dégagent deux conceptions sur la nature du son et le mécanisme de propagation au niveau macroscopique. Les expériences consistent en des interviews de 10 étudiants canadiens que l'on peut considérer comme confirmés puisqu'ils se préparent à devenir enseignants. Les discussions ont pour support des expériences relativement classiques (manipulation de diapasons, création d'une impulsion sonore devant une bougie...) ou des documents issus de manuels de physique (représentation d'une chaîne de ressort pour illustrer la propagation du son). La classification suivante est une reconstruction des chercheurs, les points de vue macroscopiques et microscopiques n'étant pas forcément séparés dans le discours des étudiants. Les deux types de conception sont les suivants.

Le son est une sorte de **substance délimitée spatialement se déplaçant avec de l'impetus**, souvent constituée d'une portion d'air. Le son serait une **sorte de vent** ou bien quelque chose d'abstrait et assez mal identifié qui pousserait l'air. L'attribution d'impetus à cet "objet" rend compte des descriptions faites dans le paragraphe précédent (vitesse diminue avec l'amplitude, diminue au cours du déplacement, fusion énergie-amplitude-vitesse...).

Le son est une substance qui serait une sorte de **perturbation** qui se propage. Pour désigner cette perturbation, les étudiants utilisent des termes scientifiques qui ont été rencontrés dans l'enseignement : vibration du milieu, variation de densité, de pression...

Le terrain ne semble donc pas très favorable pour le découplage à faire entre le milieu et l'onde comme concept, découplage nécessaire pour interpréter le transfert de l'information vibratoire. La phénoménologie du son induit une fusion entre le son qui se déplace et ce qui en est forcément le support, le milieu. Le fait que l'on souffle et que l'on émettent des sons par la bouche (invocé par Piaget), ne semble pas la seule explication à ce qui apparaît comme une conception très résistante à l'enseignement.

III.3.2.2 Aspects microscopiques

Pour distinguer ce qui relève d'une analyse macroscopique d'une part et d'une analyse microscopique d'autre part, nous considérons à la suite de Linder et Erickson que le point de vue microscopique est adopté dès qu'il est fait appel à des entités discrètes du milieu, qu'elles soient dénommées molécules ou particules par les étudiants. A l'inverse la perspective macroscopique invoque le milieu dans son ensemble ou les propriétés macroscopiques servant à la décrire (pression et densité par exemple).

Dans le cas étudié, le niveau des étudiants et leurs connaissances en science facilitent le recours au niveau microscopique, ce que Halbwachs appellerait ici une

explication bathyène. Les deux types de conceptualisations dégagées sont décrits ci-après.

Le son est une entité qui est **portée par les particules**. Les molécules elles-mêmes se déplacent dans des directions que les étudiants n'arrivent pas à définir clairement mais qui seraient plutôt radiales. Ce mouvement est éventuellement saccadé (en respect des vibrations de la source).

Le son est une entité abstraite qui est **affectée aux particules**, de proche en proche, par un mécanisme ressemblant à la conduction. A l'arrivée du son à leur niveau, les particules abandonnent leur état naturel pour prendre un état "sonore" qui se manifeste par un petit mouvement, une variation d'énergie ou une perturbation quelconque. On retrouve dans ce cadre soit un "effet dominos", soit quelque chose qui ressemble à une réaction en chaîne du type par exemple "chaîne d'atomes".

Il est bien entendu que les conceptions sont ici relativement élaborées (car reconstruites par les chercheurs le plus précisément possible à partir des productions des étudiants). Nous retrouvons néanmoins certains de ces aspects à des niveaux précédents l'université (par exemple Derradj et al, 1994).

Finalement, nous pouvons tenter de résumer dans le tableau III.3-1 les points de vue macroscopiques et microscopiques selon qu'ils induisent un déplacement d'ensemble du milieu ou non.

Tableau III.3-1: conceptions classiques au sujet de la nature du son et du mécanisme microscopique de propagation

	déplacement (éventuel) du milieu	milieu comme support
<u>Vision Macroscopique (M) :</u>	M1 : son = "entité" de type matériel en mouvement - se déplace d'autant "mieux" (vite, loin) que l'émission est forte, - crée un courant d'air	M2 : son = "entité" en mouvement, sous forme de perturbation mal définie (vibration, densité, compression, variation de pression, perturbation...)
<u>Vision microscopique (μ):</u>	μ 1 : entité portée par les molécules particules en mouvement radial ou en mouvement saccadé	μ 2 : entité affectée aux molécules particules devenant «sonore » par "conduction" ou effet dominos, chocs ou mécanismes type « chaînes d'atomes »...

Il est bien entendu qu'un point de vue microscopique et un point de vue macroscopique peuvent coexister pour l'élève.

Évidemment, ces points de vue microscopiques induisent des conceptions variées

sur le comportement du son dans l'espace, en particulier sur l'effet du milieu sur la vitesse du son et donc sur la facilité du son à se propager (si, comme c'est souvent le cas, vitesse et facilité de propagation sont corrélées). Dans un article qu'il consacre à ce sujet, Linder (1993) dégage trois points de vue différents, les deux premiers faisant clairement intervenir le niveau microscopique :

La vitesse du son dépend de la taille et du nombre de particules. Celles-ci sont vues comme gênantes pour le son et Linder souligne que, pour les étudiants, ce point de vue a l'avantage supplémentaire par rapport au point de vue macroscopique correspondant (le milieu comme résistant au son) d'être formulé en termes scientifiques.

La vitesse du son dépend de l'écartement entre particules. C'est le cas lorsque le point de vue microscopique attribue aux particules le rôle de support du son (2^e point de vue microscopique). En effet le transfert du son sera d'autant plus rapide et facile que les particules sont proches les unes des autres. Plus il y aura de particules plus le son sera transmis rapidement (ce qui donne un résultat en accord avec la physique) et plus la quantité de son transporté sera importante (ce qui permet d'interpréter qu'il n'y a plus de son dans le vide). Cette conception est donc relativement solide et cohérente avec les faits expérimentaux et les savoirs de la physique éventuellement retenus par les étudiants.

Un troisième point de vue concerne le rôle de l'élasticité. La vitesse augmenterait avec la compressibilité, ce qui serait en accord avec la physique. En fait les étudiants identifient la compressibilité et l'élasticité, ce qui n'est pas possible en physique. L'élasticité en physique (le module d'Young pour un solide) est très différente de la notion d'élasticité dans la vie quotidienne (où ce qui est élastique est généralement mou). Ce sujet dépasse largement le niveau secondaire.

Enfin, nous pouvons tenter de résumer par des enchaînements logiques sous-jacents les différentes conceptions sur les liens entre vitesse (déplacement) et milieu. Les liens entre conceptions ne sont pas forcément établis par les sujets de façon systématique mais ont été suffisamment mis en évidence pour être mentionnés dans la figure III.3-2.

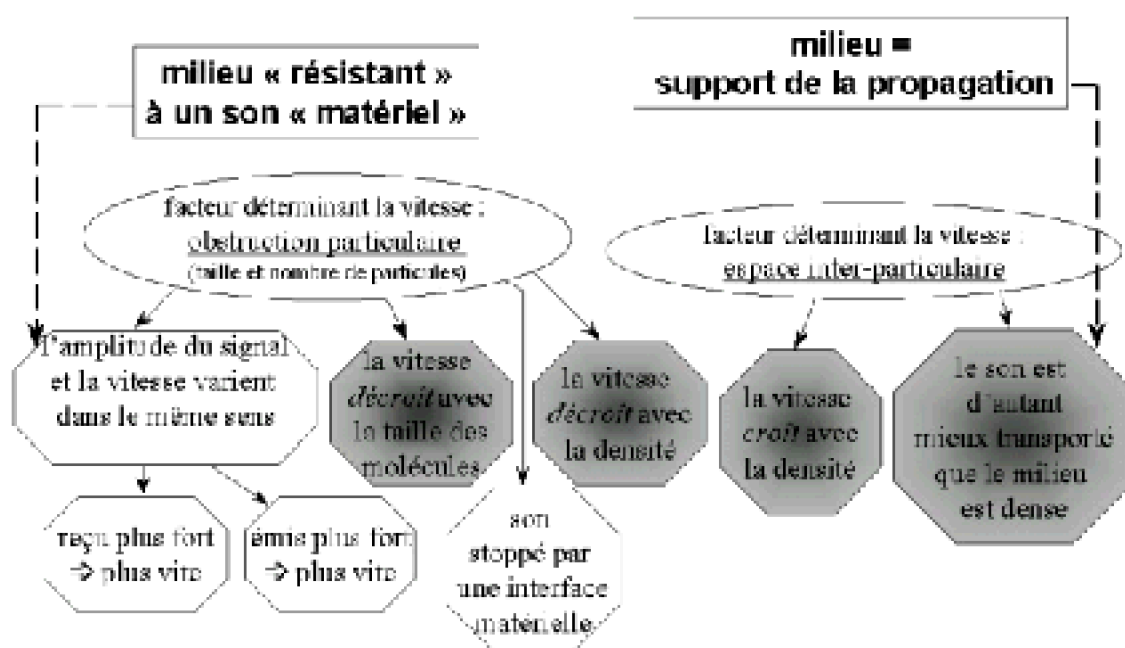


figure III.3-2 : synthèse des liens possibles entre conceptions rencontrées couramment (en gris les conceptions rencontrées essentiellement au niveau universitaire)

III.3.3 Études au sujet des concepts scientifiques introduits par l'enseignement

Certains travaux s'intéressent aux raisonnements des élèves après enseignement sur des sujets qui ne peuvent manifestement pas être soumis à des élèves débutants. Ces auteurs ont alors à prendre en compte l'enseignement suivi (avec les problèmes méthodologiques inhérents à ce type d'approche puisqu'il est généralement difficile d'avoir une connaissance précise de l'enseignement effectivement suivi). Il n'est par exemple pas envisageable de demander à un élève son point de vue sur la diffraction et les interférences acoustiques avant qu'il n'ait rencontré ces concepts en classes.

Certains résultats précédents concernaient déjà des étudiants, parfois expérimentés en physique. Dans ce paragraphe, il s'agit en plus d'évoquer les sujets introduits *a priori* par la physique. Beaucoup de conceptions erronées semblent avoir été favorisées, voire introduites, par l'enseignement de certaines de ces notions de physique (Linder, 1992).

Ainsi, Maurines (1999) a réalisé un important travail sur la propagation des ondes sonores et lumineuses en dimension trois. Elle mène une analyse assez fine sur l'influence de l'enseignement mais aussi sur le rôle joué par les différentes représentations dans les manuels scolaires, de vulgarisation ou dans la vie de tous les jours (représentation en surface d'onde ou en rayon, voir chapitre II) sur les situations de diffraction et d'interférences. Il ressort par exemple que par rapport à la lumière, la représentation favorisée pour le son est toujours, parmi les deux possibles, la surface d'onde (on peut y voir la trace d'une mise en correspondance avec les ondes à la surface de l'eau bien plus fréquente dans l'enseignement pour le son que pour la lumière).

Linder (1992), pour sa part, plaide, après analyse de l'enseignement du son et ses

échecs patents, pour un abandon du *comment faire* (des calculs en particulier) au profit d'une compréhension des phénomènes. Comprendre le phénomène de la propagation du son est en cela un défi intéressant car difficile si l'on souhaite ne pas s'en tenir à la capacité de faire des calculs. Il explique ainsi comment une courbe (sinusoïdale par exemple) représentant en fonction de l'espace le déplacement des masselottes sur une chaîne de ressorts (pour illustrer le mécanisme de propagation) à un instant donné induit des confusions très fortes chez les étudiants (en particulier entre perturbation longitudinale et transversale). Il plaide également pour une méfiance accrue pour les analogies ondulatoires macroscopiques, le plus souvent transversales. Il cite à l'appui Feynman qui estimait que les ondes à la surface de l'eau, reconnues par tous comme l'exemple typique d'ondes et citées en exemple dans les cours élémentaires ou les journaux et ouvrages de vulgarisation (par exemple Serres et Farouki (1997)), sont le pire exemple qu'on puisse trouver parce qu'elles ne sont en rien similaires au son et à la lumière¹⁸.

Linder cite enfin un autre exemple au sujet de la longueur d'onde. Les étudiants qu'il a interrogés donnent tous, pour l'ordre de grandeur (obtenu sans calcul) de la longueur d'onde du son d'un diapason (440 Hz) le millimètre (ou beaucoup moins). Il y a donc une focalisation sur la grandeur qui semble caractériser l'événement, à savoir ici l'amplitude de vibration. Après avoir calculé la valeur par la formule qu'ils connaissent, certains restent convaincus de leur intuition mais affirment qu'ils indiqueraient la valeur donnée par le calcul pour un contrôle de connaissances. Il y a donc ici un découplage complet entre la capacité à faire le calcul d'une grandeur et la compréhension que l'étudiant croit en avoir, et qu'il admet même ne pas être cohérente avec le calcul.

Nous avons vu au chapitre II qu'en seconde, le programme demande de savoir calculer la longueur d'onde, bien plus que d'en comprendre la signification. Pour illustrer les difficultés de compréhension d'une grandeur aussi complexe, nous donnons ci-après quelques définitions données par des élèves de seconde, après la fin de l'enseignement de la partie "sons et ultrasons". Chaque phrase a été produite par un élève à chaque fois.

Une longueur d'onde est une distance entre deux signaux.

La longueur d'onde est la distance de cette onde entre deux points.

L'onde sonore λ est le temps qui s'écoule entre chaque période de l'onde sonore.

La longueur d'onde d'une onde est la longueur mise par le temps pour parcourir une fréquence.

La longueur d'onde est la longueur que met une onde pour parcourir une période.

¹⁸ L'analogie classique dont il est question (vagues à la surface de l'eau) sera évoquée dans la dernier chapitre ; le fait d'utiliser une onde transversale permet notamment de rendre plus facile l'établissement de la formule $\lambda = v.T$.

- . La longueur d'onde, c'est la distance qu'une onde parcourt.
- . La longueur d'onde d'une onde sinusoïdale est la distance qu'elle parcourt pendant une seconde.
- . La longueur d'onde d'une onde sinusoïdale est la distance qu'elle parcourt pendant une période.
- . La longueur d'onde est le temps mis pour le trajet entre l'émetteur et le récepteur.

III.3.4 Critiques et enseignements à tirer de ces travaux

III.3.4.1 Analyse critique

Malgré le peu de travaux (en comparaison d'autres domaines) sur les conceptions concernant le son, nous pouvons formuler une analyse globale.

Il est d'abord remarquable de constater que beaucoup de ces travaux concernent les étudiants, avec un diagnostic qui permet de mesurer l'ampleur des améliorations à apporter à l'enseignement de ce domaine (ou à l'articulation de ce domaine avec d'autres sujets appris). Ceci peut s'expliquer par la relative absence de l'acoustique dans les contenus du secondaire. Maurines, cependant, s'est intéressée à ce niveau et a joué un rôle moteur pour les recherches sur ce thème. Venue aux phénomènes sonores par l'intermédiaire de phénomènes ondulatoires mécaniques, elle a permis la mise en évidence de raisonnements similaires à ceux qui sont identifiés en mécanique élémentaire (et par suite le caractère matériel attribué au son). Par contre, les investigations sur les aspects spécifiques du son ont parfois été laissées de côté ou en tous les cas pas exploitées complètement (par exemple type de propagation en champ libre ou mécanisme de propagation).

En particulier, il est plus rare de trouver des recherches sur la mise en correspondance *avant enseignement* entre paramètres perceptifs et grandeurs physiques ou même entre paramètres perceptifs eux-mêmes. Finalement les facettes multiples du son (chapitre I), les rapports complexes à la perception quotidienne et leur influence sur des processus d'apprentissage n'ont été que rarement questionnés. Ceci peut alors amener quiproquos et fausses pistes dans l'analyse des réponses.

Signalons cependant à ce sujet l'étude menée à l'INRP auprès d'élève de 3^e en éducation musicale et d'élèves de seconde en cours de formation (Beaufils et al., 1998). Cette étude s'intéresse à la description de sons perçus par les élèves. Elle révèle des capacités générales moyennes dans la reconnaissance de sériations aigu/grave ou fort/faible à condition toutefois qu'il s'agisse du même instrument (en particulier pour la reconnaissance de hauteur). Il semble donc qu'un enseignement basé sur la perception des sons devrait prendre soin de proposer des activités spécifiques dédiées à un travail

de reconnaissance des sons et d'entraînement "de l'oreille".

Cette étude mise à part, quand la perception intervient dans les situations proposées par les chercheurs (et encore s'agit-il plus souvent d'imaginer la perception que de percevoir réellement), la fusion a été très vite opérée par les chercheurs entre grandeurs physiques et caractéristiques auditives alors que c'est cette mise en correspondance qui risque de poser les premiers problèmes à l'apprenant. Par exemple, lorsque Maurines propose une situation où il faut comparer les arrivées de deux sons dont l'un est plus fort qu'un autre, elle adopte immédiatement le point de vue du physicien en présentant les résultats comme les avis des élèves sur **"la vitesse du son dépend-elle de l'amplitude ?"** (Maurines, 1998, p.17). Le lien entre amplitude et fort/faible ou entre fréquence et aigu/grave n'a *a priori* rien d'évident pour l'élève puisqu'il n'est même pas censé connaître les concepts physiques impliqués. Ce sont ces liens qui sont justement à apprendre.

Le choix fait implicitement ou explicitement dans de nombreux travaux sur les conceptions (pas seulement sur le son) de prendre comme référence le savoir à enseigner (ou le savoir savant) et de comparer les réponses des élèves à celles qui seraient issues du savoir à enseigner ne nous paraît pas forcément la méthode la plus appropriée pour prendre pleinement en compte la phénoménologie de l'élève débutant. Le cours extrait ci-dessous de Johsua et Dupin (1993) nous paraît assez révélateur à ce sujet :

"Trop souvent, les chercheurs en didactique ont eu tendance à jauger des productions et discours d'élèves à l'aune de concepts scientifiques absents en tant que tels dans les conceptions des élèves. Sous des appellations parfois semblables, ceux-ci utilisent en réalité plus des "notions" que des concepts. Lesquelles notions sont plutôt trop "riches" (pas assez différenciées) que trop pauvres." (p.128).

Et reprenant l'exemple de l'élan ou du capital hybride des conceptions en mécanique, ils affirment :

"Cette intuition comprend des aspects de concepts que le physicien appelle vitesse, force, quantité de mouvement, énergie, etc. Mais elle ne s'y résume pas ; cette intuition ne doit pas seulement être évaluée par rapport au savoir du physicien ; elle a sa pertinence propre, son domaine particulier d'application." (p.129).

Tout se passe comme si, dans ces conditions, il fallait mesurer l'écart entre les conceptions des élèves et le savoir de la discipline pour comprendre pourquoi l'élève a tant de mal à s'adapter aux situations proposées par la physique. Au contraire, il nous semble que choisir d'autres critères d'analyse permettrait, dans certains cas, **d'envisager les conditions favorables pour adapter le savoir à enseigner aux phénoménologies naïves dégagées hors de toute référence au savoir savant**. C'est ce point de vue qui sera adopté pour les expérimentations que nous avons menées et qui sont présentées dans la partie C.

III.3.4.2 Premières conséquences pour l'enseignement et l'apprentissage

Outre la voie que nous venons de signaler, la revue bibliographique présentée nous inspire quelques réflexions de deux types.

Au sujet des investigations futures à mener :

• Pour permettre une meilleure distinction entre ce qui relève des concepts de la physique et ce qui relève des perceptions, il nous paraît indispensable de mener des investigations larges mais précises sur la phénoménologie des apprenants au sujet de phénomènes sonores "simples" et quotidiens. Ceci est crucial, surtout au regard des réflexions du chapitre I. Linder et Erickson soulignent d'ailleurs la possible influence d'une limitation biologique dans la perception dans les difficultés d'apprentissage observées.

• Linder et Erickson soulignent également le manque d'outils linguistiques appropriés et disponibles pour les apprenants pour décrire les phénomènes sonores. Il serait intéressant de connaître les outils linguistiques effectivement utilisés et utilisables et les traits sémantiques que les élèves leur associent. Ceci permettrait alors, dans un second temps d'analyser l'écart avec le vocabulaire de la physique et les significations que la physique attribue à certains termes. Ceci sera l'objet du chapitre IX de la partie C.

• Ces investigations permettront de repérer des éléments des systèmes explicatifs utilisés par les élèves pour décrire et/ou expliquer des situations quotidiennes relatives au son (Partie C). Elles seront un outil supplémentaire pour connaître la phénoménologie des élèves et pour éventuellement redéfinir alors le "réfèrent empirique" proposé par l'enseignement (Martinand, 1987).

Au sujet des conséquences pour l'enseignement :

• Nous avons déjà pointé l'intérêt qu'il pourrait y avoir à orienter davantage l'enseignement initial sur la reconnaissance des paramètres perceptifs pertinents pour comparer des sons. Ceci passe par des exercices auditifs qui permettent de limiter les différences de capacités des élèves à ce sujet et d'adopter un vocabulaire commun pour toute la classe.

• Comme il a été remarqué dans une des recherches citées (Asoko et al., 1991), il semble que les élèves n'aient pas de théorie générale sur l'émission sonore ou sur la propagation du son qui soit transférable à des contextes très variés. Nous tenterons de donner des éléments de confirmation de cette tendance. Si elle se confirme, l'enseignement se doit de prendre ceci en compte en proposant explicitement des modèles accompagnés de leur domaine de validité.

• A la suite des travaux de Linder (1992), il serait peut-être intéressant de proposer un enseignement qui se concentre sur la propagation de l'onde *sonore* sans forcément utiliser au préalable des analogies ondulatoires. Une fois les propriétés ondulatoires dégagées sur un exemple, il peut alors être envisageable de décontextualiser l'onde

(variations temporelles et spatiales) puis de recontextualiser sur d'autres exemples. Reste à savoir si ceci est réalisable au niveau secondaire français.

Chapitre IV Hypothèses et questions de recherche

Les chapitres précédents ont permis de mettre en évidence les éléments de réflexion qui nous paraissent indispensables dans un projet d'amélioration de l'enseignement de l'acoustique élémentaire, et plus généralement de la physique élémentaire. Il s'est agit :

- d'explorer les points de vue phénoménologiques variés sur un champ large de phénomènes (en l'occurrence sonores) ;
- de délimiter (en particulier au regard de l'histoire) ce qui peut et/ou doit relever de l'enseignement de la physique dans ce champ phénoménologique ;
- de décrire le savoir à enseigner officiel et de tenter d'en comprendre les objectifs et les moyens ;
- enfin, de brosser un panorama des travaux sur les connaissances d'enfants, d'élèves débutants ou d'étudiants sur le sujet.

Outre ces réflexions, nous nous proposons maintenant d'aller plus loin dans ce projet en avançant dans des directions non encore explorées au sujet du son. Nous exposons dans ce chapitre les questions de recherche auxquelles nous essaierons de répondre. Les parties suivantes décrivent les méthodes et les expérimentations mises en oeuvre à cet effet. La source de ces questions réside bien évidemment en grande partie dans les remarques, réflexions, ou manques de connaissances révélés par les chapitres précédents. Elles sont également construites sur quelques hypothèses¹⁹ de recherches que nous évoquerons ici quand elles n'auront pas déjà été mentionnées.

IV.1 Le "son" : un cas caricatural pour les problèmes d'enseignement et d'apprentissage de la physique ?

Au regard d'autres sujets de la physique, le son apparaît comme un cas d'école en ce qui concerne les problèmes qu'il soulève pour l'enseignement de la physique. Cela ne veut pas dire qu'il est le représentant idéal pour une éventuelle généralisation des travaux de recherche à son sujet à l'ensemble de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique. Nous voulons seulement indiquer ici les caractéristiques des phénomènes et

¹⁹ Nous prenons ici hypothèses au sens de propositions *posées au départ* et non de propositions à tester.

des savoirs que nous étudions qui nous paraissent amplifiées par rapport à d'autres sujets plus classiques dans les curriculums (électricité et optique en particulier), et donc pertinents pour une réflexion plus large au sujet de l'enseignement et l'apprentissage de la physique.

IV.1.1 De la quotidienneté et évidence des phénomènes à des situations propices à l'enseignement

Dans un premier temps, en ce qui concerne les phénomènes sonores, il est utile de rappeler leur caractère familier, omniprésent et finalement inhérent à la présence de tout individu dans le monde sensible (chapitre I). Le problème épistémologique classique de l'articulation de ces faits observables avec le discours que la science peut tenir à leur propos a été évoqué. Ce problème est crucial dans une logique d'enseignement puisque sous-tendu par un éventuel conflit entre concepts quotidiens et concepts scientifiques (Vygotski, 1934). Pour Vygotski, c'est à partir de cette expérience sensible quotidienne que l'enfant forge ses concepts quotidiens. Vygotski attribue quatre caractéristiques principales aux concepts quotidiens :

- . référence et centrage sur des objets et des événements, à propos de situations particulières ;
- . inconscience de leur maniement de la part de l'utilisateur (et donc impossibilité du maniement volontaire) ;
- . non-intégration dans une pensée systématique ;
- . base du développement des concepts scientifiques.

Comme nous l'avons vu, **les phénomènes sonores, par leur quotidienneté, leur omniprésence dès la naissance (et donc tout au long du développement de l'enfant) procurent a priori une richesse et une variété à l'expérience personnelle de l'enfant et à son champ empirique qui va nourrir les concepts quotidiens (Hyp. 1)**. C'est donc sur ce premier aspect des concepts quotidiens que nous nous attardons quelque peu pour souligner l'importance qu'il va pouvoir prendre dans un cas comme celui du son. Le concept quotidien se développe **"dans la sphère de l'application concrète, spontanée, dont le sens est déterminé par la situation, dans la sphère de l'expérience et de l'empirisme"** (Vygotski, 1934, p. 373). Il est donc indispensable pour nous de nous pencher sur la nature de ces structures conceptuelles quotidiennes au sujet des phénomènes sonores. Pour ceci, il faut avoir conscience que l'élaboration mais aussi la révélation (par la production écrite ou orale) des systèmes conceptuels se fait à partir de la perception et de la description de ce que Guillaud appelle des "faits bruts" (1999, p.71), **"perçus et construits dans le cadre théorique de la connaissance quotidienne". Les faits bruts sont "saisis et construits à partir de l'intuition sensible"** et correspondent

finalement aux constatations partagées par le plus grand nombre, ce qui tend à leur donner un caractère d'évidence. A l'inverse des faits scientifiques, ils ne sont pas construits dans un cadre théorique scientifique déterminé. Les faits bruts sont la plupart du temps décrits en terme d'actions d'objets du contexte ou de relations causales impliquant des objets ou des caractéristiques de la situation. Ces descriptions que Guillaud appelle "primaires" sont toujours fortement contextualisées et elles ne mettent pas en oeuvre de mécanismes explicatifs globalisants (au sens où ils sont valides pour expliquer un grand nombre de situations apparemment très différentes).

Nous pensons donc que **les phénomènes sonores ont un caractère d'évidence plus fort que pour d'autres champs phénoménologiques traditionnels dans l'enseignement de la physique (Hyp. 2)**. Il est plus facile de prendre conscience de l'existence d'un champ empirique électrique ou thermique que de celle d'un champ acoustique ou optique²⁰. En d'autres termes, si nous nous posons la question de ce qui peut être consciemment perçu comme un phénomène dans la vie quotidienne, il nous semble qu'il est plus facile d'avoir conscience de la sensation de chaud ou de froid, d'une variation de température d'un objet que l'on touche ou de l'éclairage d'une ampoule (en tant que *phénomène*) que de l'apparition d'un bruit (ou d'un bruit de fond) ou d'une ombre (ou du fait que si on ferme les rideaux il y a moins de lumière). L'omniprésence des appareils électriques dans nos sociétés occidentales tend d'ailleurs à minimiser l'attribution du caractère de phénomène aux manifestations observables dues aux appareils électriques²¹.

Dans un cas aussi familier que le contexte sonore, nous pouvons donc nous attendre à un poids accentué des situations familières et des faits bruts dans la description des objets et des événements par l'apprenant.

Ces réflexions nous permettent de formuler un premier groupe de questions sur **les situations propices à l'enseignement** :

Thème n°1 : les situations propices à l'enseignement :

Existe-t-il des situations familières qui favorisent l'abandon, après un enseignement, des descriptions primaires au profit de descriptions et d'interprétation s'inscrivant dans un système explicatif faisant intervenir des concepts scientifiques ?

Dans ce cas, qu'est-ce qui caractérisent ces situations ?

²⁰ Les phénomènes mécaniques nous semblent revêtir comme les phénomènes sonores un caractère d'évidence. Ils en diffèrent par contre par d'autres aspects, relevés plus loin.

²¹ Peu de temps après l'invention de l'électricité, ou plus tard lorsqu'elle a pénétré les foyers, le fait qu'une ampoule s'allume était un phénomène (à expliquer éventuellement). En devenant quotidien, ce fait tend à devenir une évidence qui n'est plus remarquée. Le son, quand à lui, ne connaît pas ce type d'évolution liée à la technique puisqu'il est concomitant à l'homme depuis toujours et surtout depuis la naissance.

Ceci permettra dans un second temps de donner des éléments de réponses aux deux questions :

Est-il avantageux de proposer ces situations pour l'enseignement ?

La familiarité des phénomènes sonores est-elle un frein à l'émergence et l'utilisation des concepts scientifiques même après enseignement ?

IV.1.2 De la différence de champ phénoménologique (entre analyse quotidienne et physique) à l'élaboration d'un enseignement

Pour décrire et interpréter les objets et les événements, le physicien utilise une phénoménologie que nous avons largement décrite, dans le cas des phénomènes sonores, au chapitre I. Nous avons vu comment, à partir de l'étude des phénomènes sonores, la physique passe à l'étude des vibrations mécaniques ou à l'étude du champ propagatif de surpression. Ainsi, il est remarquable de constater l'écart important entre la phénoménologie quotidienne, basée sur la perception auditive, et la phénoménologie adoptée par la physique, basée sur l'observation des phénomènes mécaniques (sans exclure cependant la corrélation avec les perceptions auditives). Cet écart est également observable si au lieu de considérer la phénoménologie du savoir savant on regarde celle du savoir à enseigner. Ceci n'est pas toujours aussi flagrant pour d'autres domaines de la physique couramment enseignés dans le secondaire. Par exemple en mécanique, il y a un relatif accord entre les situations auxquelles l'apprenant pense pouvoir se référer et ce qui est reconnu comme objets et événements à étudier par la physique (même si concrètement, la physique réorganise ces objets et événements pour reconstruire un champ expérimental plus propice à la modélisation et à l'introduction des concepts pertinents).

Nous formulons donc l'hypothèse suivante : **le son est un sujet caricatural de la différence événementielle entre vie quotidienne et physique dans la mesure où la perception des phénomènes sonores n'induit pas les mêmes champs phénoménologiques pour le sens commun et pour la physique (Hyp. 3)**. Ceci rend d'autant plus délicat l'enseignement d'un tel domaine car le recours à des perceptions quotidiennes pertinentes du point de vue de la physique est alors bien difficile à exploiter. La physique va changer de sujet d'observation et de description.

Ceci nous amène alors à formuler un 2^e groupe de questions qui ont motivé les investigations de ce travail. Ces questions concernent **l'élaboration d'enseignements** au sujet du son :

Thème n°2 : l'élaboration de séquences d'enseignement :

Sur quelles situations empiriques appuyer l'enseignement de physique pour garder une relation forte avec le champ phénoménologique sonore ?

Quelles contraintes sur l'enseignement et l'apprentissage fait peser une différence de champ phénoménologique dans la perception de ce qui est reconnu comme phénomène acoustique, du point de vue quotidien d'une part, du point de vue de la physique d'autre part ?

IV.1.3 Un panel important de niveau de savoirs

Enfin, le son est caractéristique d'une autre difficulté posée à l'enseignement de la physique. La physique a en effet la capacité, une fois construite, de pouvoir traiter des problèmes du monde sensible à différents niveaux : description conceptualisée, interprétation généralisante des phénomènes (liens entre domaines différents par exemple, élaboration de principes généraux), prévision des événements, mise au point d'un protocole pour tester une hypothèse, invention d'une expérience de pensée, etc. De plus, le physicien peut sélectionner dans la situation les paramètres que la théorie lui permet de juger pertinents en réponse au problème posé. Il s'opère ainsi un tri des paramètres ou un raffinement plus ou moins grand des modèles utilisés. Les causalités mises en jeu peuvent être de natures variées. La physique a donc à sa disposition cette variété de niveaux de réponses de méthodes et de raisonnements. Le domaine acoustique nous semble à ce sujet tout à fait typique. La richesse du champ phénoménologique y est sûrement pour beaucoup et la diversité des disciplines s'intéressant au son en est un des révélateurs. Nous verrons un peu plus loin que c'est aussi le cas, dans une moindre mesure pour le savoir à enseigner. Une situation de propagation sonore peut par exemple être analysée en terme de déplacement du son (mesure de la vitesse, prise en compte d'éléments d'acoustique géométrique) mais également donner lieu à une analyse du mécanisme de propagation par analogie avec d'autres phénomènes ondulatoires ou par adoption d'un point de vue particulière.

Tous ces éléments font de l'enseignement du son un sujet prototypique, voire amplifiant, pour étudier les processus d'enseignement et d'apprentissage de la physique élémentaire. Si nous avons soulevé ici des caractères qui se présentent plutôt comme des difficultés potentielles, il ne faut pas négliger non plus les spécificités du son (parfois les mêmes) qui pourraient contribuer à en faire un sujet peut-être moins difficile que d'autres. Nous reviendrons plus loin sur les liens possibles de cohérence entre concepts scientifiques et concepts quotidiens par exemple. Signalons également que dans le cas du son, l'intuition quotidienne que nous avons mentionnée dans le paragraphe IV.1.1 heurte sans doute moins que dans d'autres domaines les explications scientifiques (nous pensons par exemple à la mécanique). Peut-être parce que le sujet est moins conceptualisé même du point de vue quotidien, il n'est en effet pas évident de trouver l'équivalent pour le domaine sonore de cadres conceptuels spontanés qui font obstacle, dès l'introduction du domaine, à l'apprentissage de la physique parce qu'en contradiction profonde avec les cadres explicatifs que celle-ci propose (cas de l'impétus par exemple en mécanique).

La particularité du domaine sonore étant soulignée, il s'agit alors de se demander quelles sont les voies à explorer et quelle(s) méthodologie(s) de recherche permettent d'y

progresser.

IV.2 Articulation entre la recherche et l'enseignement et ses effets

Avant d'aller plus loin dans nos investigations, nous nous proposons d'étudier l'influence de résultats de la recherche en didactique (chapitre III par exemple) et des grandes lignes des réflexions phénoménologiques du chapitre I sur l'élaboration de séquences d'enseignement concernant *toute* la partie "sons et ultrasons" du programme de seconde décrit au chapitre II. Cette démarche d'articulation entre recherche et innovation est maintenant pratiquée depuis quelques années, en particulier grâce à des relais institutionnels tels que l'INRP. M. Méheut souligne dans un important travail à ce sujet trois types d'analyse préalable à l'élaboration (et la prévision de leurs effets) de situations d'enseignement (Méheut, 1998, p. 34) :

analyse épistémologique : explicitation des connaissances scientifiques visées et réflexion sur les conditions historiques de leur élaboration, concepts essentiels mis en oeuvre par la discipline, modèles utilisés. Cette analyse a été ébauchée dans les chapitres I et II et sera complétée dans le chapitre V ;

analyse didactique : contraintes institutionnelles, temps scolaire, évaluation, suivi curriculaire. Ces paramètres ont été longuement exposés au chapitre II ;

analyse psycho-cognitive : connaissances préalables, difficultés et possibilités des élèves. Le chapitre III donne quelques éléments importants à ce sujet, et nous ajoutons pour notre part la prise en compte du langage naturel dont il sera question dans la partie C.

Dans sa revue des travaux, Méheut remarque que les exemples abondent lorsqu'il s'agit de prendre en compte le premier ou le troisième point pour l'élaboration de séquences, pas seulement en France. Par contre, le deuxième point, l'analyse didactique, est le plus souvent laissé de côté puisque **"les variables liées au fonctionnement de l'institution scolaire ne sont pas discutées"** (Méheut, 1998, p. 37). A la suite des quelques rares travaux cités par Méheut (par exemple Tiberghien, 1992 ; Johsua et Dupin, 1989) qui ont un tel souci, nous décrivons dans la partie B un projet de recherche développement qui prend en compte, quitte à en repenser certains aspects, les contraintes institutionnelles. La présence d'enseignants concepteurs des séquences à côté des chercheurs garantit la pertinence des paramètres pris en compte et la faisabilité des séquences d'enseignement. De plus, une autre originalité réside dans le fait d'élaborer un tout cohérent sur l'ensemble du thème à enseigner alors que traditionnellement, pour mettre en place une ingénierie, les travaux de recherche (ou les expérimentations) investissent tout au plus quelques séances en situation réelle.

Les hypothèses de recherche préalables à cette élaboration seront détaillées dans la partie B qui lui est consacrée, puisqu'elles dépassent le cadre théorique donné dans la

partie A.

Le processus de diffusion des résultats de recherche dans des séquences d'enseignement commence finalement à être relativement classique. Il nous paraît important de ne pas négliger, symétriquement, l'apport des observations en classe, de l'innovation, des pratiques d'enseignement sur les nouvelles voies de recherche à explorer et à valider. Nous nous poserons en effet la question de l'apport d'une telle expérience sur les voies nouvelles à explorer. Même si nous resterons dans le contexte du son, c'est en partie de l'observation des élèves en situation durant ces séquences élaborées conjointement par des chercheurs et des enseignants que sont nées les nouvelles questions de recherches et les outils de recherches utilisés en conséquence, détaillés dans les parties C et D.

Si l'on schématise grossièrement, comme nous l'avons fait sur la figure IV.2-1, les influences mutuelles entre recherche et enseignement effectif, on remarque que l'étude des séquences d'enseignement permet classiquement de valider et de rétroagir sur les hypothèses ou les réflexions qui ont servi de base à l'élaboration des séquences observées (flèche "validation"). Mais les interactions entre recherche et enseignement réel sont, de notre point de vue, à questionner plus largement puisqu'il est possible d'envisager, à partir des observations en classe, de nouvelles voies de recherche ou de faire émerger de nouvelles problématiques, hors du contexte strict de l'élaboration préalable des séquences. L'observation de l'activité de l'élève ou les réflexions qui ont germé dans une stratégie de recherche (analyse du savoir à enseigner, point de vue épistémologique, analyse phénoménologique) permettent d'envisager de nouvelles problématiques de recherche, par émergence, en particulier dans le cadre scolaire, de nouvelles questions posées à la recherche en didactique. Cette démarche est mentionnée par la paire de deux flèches doubles sur la figure IV.2-1.

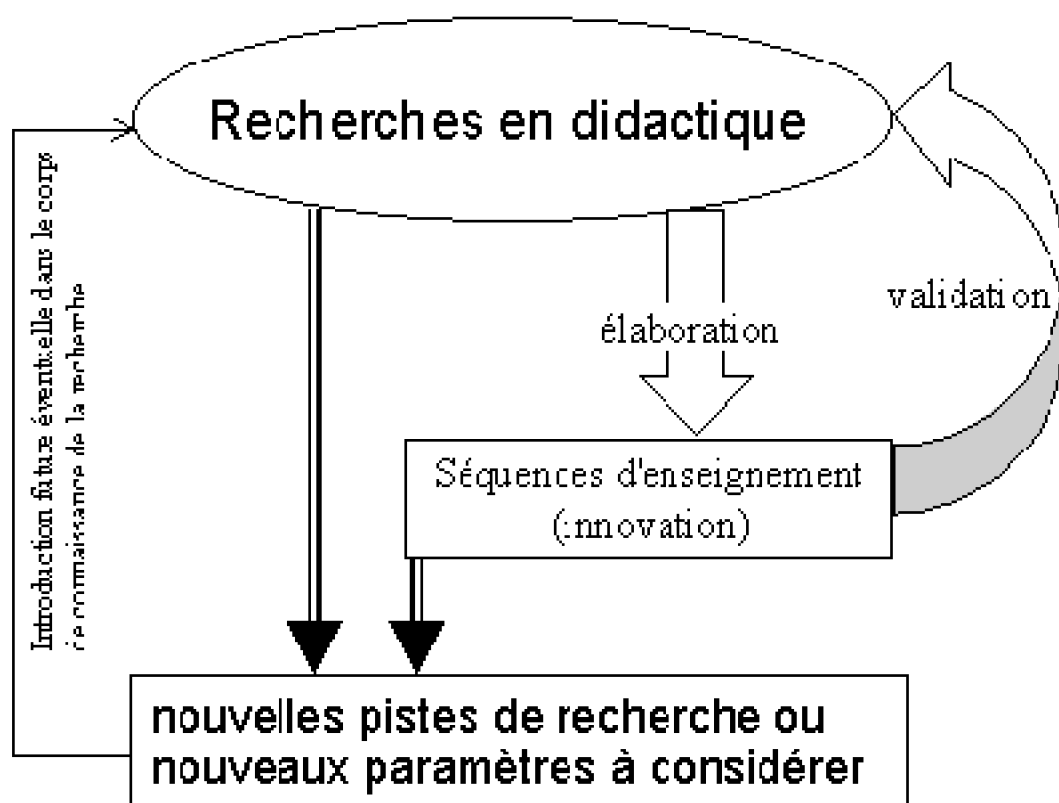


figure IV.2-1 : articulation entre recherche et enseignement

Nous nous intéressons dans le cadre de ce travail à la question classique de la validation des séquences élaborées en référence aux hypothèses préalables. La validation *par observation minutieuse de l'activité des élèves* durant les séquences a été faite par ailleurs pour les séquences qui nous concernent (Barde, 1998). Pour étudier les effets de l'enseignement élaboré collectivement, nous mènerons pour notre part dans la partie C, par passage de tests avant et après le contenu total de l'enseignement, à la fois une évaluation "interne" (passage auprès des mêmes élèves ayant suivi les séquences) et "externe" (comparaison par rapport à un groupe témoin n'ayant pas suivi les séquences) (Méheut, 1998, p. 37). Il nous sera donc possible d'envisager des éléments de réponse aux questions générales que nous formulons sur **les effets de l'enseignement** :

Thème n°3 : les effets de l'enseignement :

Comment mesurer l'effet d'un enseignement donné sur les structures conceptuelles mises en oeuvre dans la description des objets et des événements ?

Est-il possible de connaître les aspects déterminants de l'enseignement proposé pour les évolutions positives constatées ? Quelle reproductibilité et quelle généralisation ?

Quels sont les traits des descriptions phénoménologiques et conceptuelles spontanées

qui semblent les plus résistants ?

Si ces interrogations, assez classiques, sont importantes pour valider l'enseignement élaboré, il nous paraît essentiel et plus original de ne pas négliger le mouvement qui correspond aux flèches doubles sur la figure IV.2-1. Cette approche est parfois sous-estimée, même s'il arrive que l'observation en situation de classe soit signalée comme nécessaire à l'élaboration de nouveaux outils d'évaluation (Chauvet, 1996). C'est dans cette optique que nous formulons les questions de recherche du paragraphe suivant.

IV.3 De la phénoménologie et systèmes explicatifs quotidiens aux outils d'analyse des productions d'élève

La réflexion phénoménologique que nous avons exposée au chapitre I envisage les points de vue d'autres disciplines que la physique sur le son et la variété des points de vue possibles. Ces points de vue se retrouvent inévitablement dans la description et l'interprétation quotidienne des phénomènes sonores. La prise en compte des conceptions connues d'une part, de l'activité des élèves en situation d'autre part, permet de rendre raisonnable l'hypothèse suivante : **la prise en compte de points de vue et d'analyses d'autres disciplines que la physique sur un champ empirique donné permet d'enrichir la réflexion didactique sur les situations efficaces d'enseignement et sur les critères d'analyse de l'apprentissage de l'élève (Hyp. 4).**

Le problème s'est alors rapidement posé de **la prise en compte par l'enseignement de réflexions qui semblent s'éloigner du savoir disciplinaire**. Concrètement donc, comment prendre en compte des réflexions phénoménologiques (du type de celles exposées au chapitre I) pour l'enseignement de physique ?

Dans l'hypothèse, que nous adoptons, d'une nécessaire prise en compte des perceptions du monde sensible, de leurs descriptions et interprétations spontanées pour permettre un apprentissage efficace, il nous semble indispensable, pour un sujet comme le son plus encore que pour d'autres, de mieux comprendre les traits caractéristiques des systèmes explicatifs et des structures conceptuelles des élèves en référence à des situations quotidiennes. A l'inverse de la majorité des études didactiques de ce type, nous ne nous limitons pas à ce qui concerne la physique dans les productions des élèves. Ceci implique également de ne pas choisir les situations proposées seulement en référence au savoir disciplinaire traditionnel mais de proposer un champ empirique libéré des contraintes que la discipline impose parfois en excluant certaines caractéristiques des situations qui ne sont pas traitées par elle.

On peut alors formuler les questions suivantes, détaillées et traitées dans la partie C, et relatives aux **outils d'analyse des productions d'élèves** :

Thème n°4 : les outils d'analyse des productions d'élèves :

Quels outils méthodologiques sont adaptés pour analyser les productions des élèves

afin de comprendre et d'identifier leurs structures conceptuelles en référence à des situations quotidiennes ?

—

Quel est le niveau de savoir adopté ?

—

Quels sont les outils de description et d'interprétation utilisés ?

—

Quelles sont les structures conceptuelles qui émergent, quelles sont les causalités utilisées ?

Quelles grilles d'analyse utiliser pour connaître la phénoménologie quotidienne et les structures conceptuelles spontanées ? Des grilles inspirées du savoir disciplinaire de référence ou d'une analyse phénoménologique ?

IV.4 Présentation de l'information scientifique : élaboration et rôle des outils de simulation

Le dernier volet de notre recherche prend également sa source, en partie, dans les observations d'activités d'élèves et dans une perspective d'ingénierie. Le paragraphe II.2.3 de la partie A a permis de dégager les contraintes institutionnelles qui pèsent sur l'enseignement élémentaire d'un domaine aussi complexe que celui de l'acoustique. Au premier rang de ces contraintes nous plaçons celles qui concernent les représentations sémiotiques utilisables et le matériel disponible.

De plus, nous avons déjà signalé les difficultés de description et de compréhension du mécanisme de propagation dont la dépendance spatio-temporelle est en partie responsable. Pour tenter de répondre à ces difficultés majeures auxquelles se heurte l'enseignement de l'acoustique élémentaire, la partie D proposera une description d'un logiciel de simulation dédié au son, dans le cadre du savoir à enseigner institutionnel. Ce sont les démarches d'élaboration du logiciel qui seront décrites, afin de contribuer à la réflexion sur ce type de projets de plus en plus courant dans l'enseignement.

Les fondements théoriques seront développés dans la partie D. Nous ne mentionnons ici que les hypothèses que nous avons adoptées et les questions générales de recherche auxquelles ce travail se propose d'apporter des éléments de réflexion, si ce n'est de réponses.

Au sujet de la simulation nous formulons les hypothèses suivantes :

La simulation constitue un lien privilégié entre le théorique et l'expérimental ; en mettant par exemple en scène des représentants d'objets non observables réellement, elle peut favoriser l'activité de modélisation mais aussi permettre la prévision (Hyp. 5). **(Beaufils et al., 1987a, ; Grémy, 1985).**

La simulation constitue une aide à l'appropriation et à la compréhension des modèles qui la sous-tendent, à condition que les modèles soient clairement explicités avec un tel statut et que la nature de ce qui est représenté dans la simulation soit clairement explicité et distingué des objets réels, pour pouvoir être ensuite mis en relation (Hyp. 6). (**Sarmant J.-P., 1997 ; Beaufils, 1987a ; Robles, 1997**).

Pour favoriser l'efficacité d'une simulation à décrire et interpréter les objets et les événements, la simulation ne doit pas se substituer à l'expérience mais l'éclairer ; l'expérience doit pouvoir être disponible (Hyp. 7) (**Grémy, 1985**).

Au sujet des représentations sémiotiques, nous formulons les hypothèses suivantes, issues essentiellement de Duval (1995) :

L'activité conceptuelle implique la coordination de registres sémiotiques ; un même concept peut être représenté par différents registres sémiotiques, chaque représentation apportant une information spécifique à son sujet (Hyp. 8).

La distinction par l'apprenant du représentant et de ce qu'il représente est essentielle pour toute compréhension conceptuelle et traitement des représentations sémiotiques. Pour atteindre cette distinction, le passage d'une représentation à une autre doit constituer une activité à part entière. Le changement de registres sémiotiques et leur coordination facilitent alors l'apprentissage. (Hyp. 9).

Nous sommes alors en mesure de formuler les questions générales de recherche suivantes, dont nous donnerons des éléments de réponses plus ou moins contextualisés au son dans la partie D :

Thème n°5 : l'élaboration et le rôle des outils de simulation :

Quel est l'apport didactique de la simulation pour décrire et interpréter des phénomènes "invisibles" ?

Comment peut-on prendre en compte la médiation sémiotique pour concevoir des outils de simulation efficaces pour l'enseignement et l'apprentissage ?

Quel est le statut des "objets" de représentation dans une simulation ? Quelle est l'interaction avec les objets et événements réels d'une part, les concepts scientifiques d'autre part.

En quoi les modèles à la base de la simulation sont modifiés par la simulation ?

Partie B : Proposition de séquences d'enseignement

La partie A a permis de dégager d'une part les multiples facettes des phénomènes sonores et la complexité des relations entre perceptions auditives et perception du monde, d'autre part les problèmes qui peuvent en découler dans une logique d'enseignement des savoirs relatifs au domaine sonore, identifiés par la noosphère comme des savoirs de la discipline. L'analyse critique du programme actuel en cours de suppression, qui rejoint de fait celle du noyau dur historique des savoirs de physique à enseigner, et la description de quelques-unes des conceptions des élèves ont permis en outre de faire émerger la nécessité de repenser les activités proposées.

C'est à partir de cette triple analyse (phénoménologique, épistémologique et psycho-cognitive) que nous allons dans cette partie présenter une progression d'enseignement élaborée collectivement et qui respecte les textes officiels quant aux contenus à enseigner.

Le chapitre V expose les hypothèses d'apprentissage sous-jacentes à l'élaboration de cet enseignement. Nous verrons en particulier que l'activité de modélisation y occupe une place importante. Ces réflexions conduisent à dresser une analyse du savoir à enseigner selon des critères que nous exposerons. Ce chapitre dresse le cadre général théorique dans lequel se placent les séances et activités proposées dans cette progression, sans que les concepteurs en aient tous forcément conscience.

Le chapitre VI décrit concrètement les séquences proposées en montrant comment

elles s'inscrivent dans ce cadre théorique. Ce travail est le résultat d'un groupe de recherche – développement (dénommé SOC) impliquant enseignants et chercheurs. Les séquences successivement élaborées ont été utilisées durant plusieurs années par de nombreux enseignants.

Chapitre V Hypothèses pour l'élaboration de la progression et analyse du savoir à enseigner

Nous exposons dans ce chapitre les hypothèses sur lesquelles nous estimons être utile d'élaborer une progression d'enseignement. Ses hypothèses sont de types assez différents et ne viennent pas seulement de fondements théoriques épistémologique par exemple. Elles concernent également l'activité de l'élève en classe ou le rôle du milieu. Dans un second temps, nous exposerons une analyse du savoir à enseigner du point de vue de l'activité de modélisation, au sujet de laquelle nous formulons notre hypothèse essentielle.

V.1 Hypothèses d'apprentissage

Nous présentons ici les hypothèses qui permettent, de notre point de vue, d'envisager les moyens de favoriser l'apprentissage et qui sous-tendent l'enseignement proposé dans cette partie. Ces hypothèses s'inscrivent dans le courant de pensée communément appelé "constructiviste". Elles dépassent le contexte de l'enseignement du son mais nous tenterons de les contextualiser quand cela est pertinent, en prenant en compte les spécificités du savoir concerné, étudiées dans les deux premiers chapitres. Un des éléments d'origine théorique exposés concerne la modélisation, que nous jugeons constructrice de sens quant aux concepts et qu'il nous paraît donc important de favoriser dans l'activité de l'élève. Cet aspect sera plus longuement développé. Viser l'activité de modélisation pour les élèves nécessite d'analyser le savoir à enseigner de ce point de vue, ce que nous ferons dans un second temps.

V.1.1 Permettre l'explicitation des connaissances initiales des élèves et la prise de conscience de leur évolution

V.1.1.1 Hypothèses théoriques

Dans un cadre constructiviste, nous considérons que l'élève apprend à partir de ce qu'il sait déjà. Lorsqu'un apprenant est amené à décrire ou interpréter une situation du monde réel, il met en oeuvre un certain mode de description avec, sous-jacentes des "théories" ou "conceptions" dont il n'a pas conscience et que la recherche en didactique doit tenter d'analyser (cf. chapitre III). Nous considérons également que ces structures théoriques (qui renferment par exemple les structures causales utilisées par l'apprenant) sont souvent très éloignées de celle que la physique met en oeuvre pour interpréter les mêmes

situations. Une analyse du savoir à enseigner est alors symétriquement nécessaire pour pouvoir espérer prendre conscience de ce qui les sépare, établir des voies de passage entre les deux types de structures explicatives ou les rendre coexistants de façon cohérente.

Mieux repérer les connaissances initiales est un objectif classique de la recherche en didactique, qui diffuse encore peu dans le cadre scolaire institutionnel. A partir de l'état actuel de la recherche sur ce sujet, on peut estimer que la prise en compte des conceptions initiales permet la mise en place de deux stratégies importantes d'enseignement :

élaborer dans certains cas des situations-problèmes faisant émerger chez l'élève un conflit entre d'une part ses "théories" quotidiennes, ses descriptions, d'autre part ce que le professeur lui donne à voir par construction de situations bien choisies et visant à déstabiliser son point de vue. Dans le cas du son, nous pourrions par exemple citer une expérience qui permet de mettre en évidence le fait que le son se propage plus vite dans un solide que dans un gaz, phénomène qui va à l'encontre de la majorité des prévisions comme nous l'avons vu au chapitre III. Notons à ce stade que l'acoustique élémentaire nous semble un domaine moins propice que d'autres (par exemple la mécanique ou l'électricité) pour la mise en oeuvre de ces conflits socio-cognitifs : les "théories" quotidiennes ne sont pas ici en contradiction flagrante et systématique avec les mécanismes explicatifs fournis par la physique ;

repérer les *notions fondatrices* (Baker et Tiberghien, 1999) sur lesquelles il est possible d'appuyer l'enseignement. Plutôt que de rechercher le conflit, il s'agit ici d'expliciter ce qui constituent les notions ou structures théoriques des apprenants **"à partir desquelles sont construites les explications des phénomènes "** (p. 7) pour résoudre un problème. L'enseignement doit alors pouvoir s'appuyer sur ces notions fondatrices pour permettre la compréhension d'une notion fondamentale de physique. L'explicitation des notions fondatrices nécessite non seulement des investigations classiques au sujet des conceptions mais aussi une analyse importante (et même une désynchrétisation) du savoir disciplinaire permettant de dégager les notions fondamentales pour l'apprentissage du domaine. Par exemple, dans le cas du son, c'est l'analyse du savoir à enseigner qui fait émerger la vibration comme une connaissance fondamentale pour la compréhension du domaine (le physicien l'a lui tellement intégrée qu'il n'en fait plus une notion fondamentale *à apprendre*). La notion quotidienne de vibration, dont la richesse conceptuelle est bien plus faible que pour la vibration en physique, est bien fondatrice si elle constitue un germe, un point d'appui pour faciliter l'acquisition du concept de vibration en relation avec le son (Baker et Tiberghien, 1999).

V.1.1.2 Conséquences pour les stratégies d'élaboration des séquences

Ces hypothèses d'apprentissage relatives au "conflit cognitif" ou aux "notions fondatrices" conduisent à des stratégies d'enseignement différentes. Celle relative aux notions

fondatrices conduit d'une part à repérer les notions qui peuvent être fondatrices, d'autre part à "mettre en valeur" les connaissances initiales des élèves tout en les aidant à les expliciter. Ceci nous conduit à soumettre à description ou interprétation des situations les plus quotidiennes possibles, au sujet desquelles les élèves ont des choses à dire. Ainsi, nous pensons qu'il faut veiller à ne pas proposer seulement des situations "construites par la physique" en pensant déjà à ce que va permettre la discussion de la situation en termes de savoir disciplinaire (que l'élève peut vite reconnaître comme une situation ou une expérience de pensée de la physique). Schématiquement nous pensons plus fructueux de demander pourquoi un personnage plus éloigné d'un poste de radio entend moins bien plutôt que de demander pourquoi l'onde sonore s'atténue quand elle se propage. Dans le même ordre d'idée, Psillos (1998) montre, par exemple dans le cas de l'électricité, l'intérêt qu'il peut y avoir à étendre le champ expérimental classique des curriculums, à commencer les séquences par des activités "phénoménologiques" internes au champ expérimental avant de passer à la conceptualisation et à la modélisation. Dans un cas idéal, il faudrait donc chercher à prendre en compte :

- le vocabulaire connu et utilisé par les élèves, les notions utilisées à partir desquelles la physique peut construire du sens aux concepts ;

- les raisonnements et les causalités mis en oeuvre par les élèves afin de proposer des modèles et des causalités alternatives qui les prennent en compte et qui peuvent même s'appuyer sur ces explications causales initiales en inventant des situations-problèmes qui y seraient liées.

Une telle stratégie nous a permis de mettre en évidence le caractère fondateur d'une notion telle que la vibration. De plus, cela nous a conduit à utiliser l'utilisation par les élèves des adjectifs courants tels que *aigu*, *grave*, *fort* et *faible*. Nous avons alors constaté que dans certains cas, il y avait une telle confusion par rapport à l'usage qu'en fait le savoir à enseigner qu'il semblait difficile de baser d'emblée l'enseignement sur la maîtrise de ces termes. Sans ces analyses, nous n'aurions pas donné une importance telle à la modélisation qui consiste à associer le caractère aigu / grave à la fréquence de vibration et le caractère fort / faible à l'amplitude de vibration.

V.1.2 Permettre à l'élève de parler et d'écrire en coopérant pour qu'il construise et s'approprie les savoirs

Les séquences présentées dans le prochain chapitre sont élaborées en prenant en compte la coopération rendue possible par le travail en binôme lors des séances en demi-groupe. Certaines activités s'appuient même explicitement sur le travail "à deux". Si la pratique expérimentale en binôme est maintenant classique (Tiberghien et al, 1998), la phase de rédaction et de réflexion n'est pas toujours une coconstruction. Elle est ici favorisée, en accord avec les nombreux résultats de recherche qui indiquent l'apport d'une telle démarche, et tout particulièrement du débat argumentatif, sur l'apprentissage (Baker, 1996).

Ainsi, il est avantageux de demander aux élèves de formuler à *deux* une réponse commune. Du côté de l'enseignant ceci demande le respect d'une réserve initiale quant aux savoirs à élaborer. Pour le binôme d'élèves, ceci implique dans un premier temps un dialogue oral qui permet de confronter les observations faites et les idées de chacun au sujet de l'objet de savoir en jeu afin de tendre vers un accord et dans un second temps un effort de rédaction coélaborée. Aucune de ces deux phases n'est à négliger.

L'intérêt de la première de ces deux phases (dialogue plus ou moins argumentatif, échange oral) revient à considérer l'apport du rapport social pour l'apprentissage, ce qui est relativement bien reconnu, en particulier depuis le milieu du siècle grâce aux travaux de Vygotski (1934). L'échange oral, surtout s'il est argumentatif, favorise l'explicitation, la construction et finalement l'appropriation des savoirs, **"dans l'émergence des représentations et l'élaboration du savoir au travers du conflit socio-cognitif "** (Baudry et al., 1998, p.90), alors que c'est plus souvent la fonction de communication qui est évaluée.

Quant à la deuxième phase (la rédaction si possible coélaborée), c'est justement parce que ce qui est surtout évaluée est la capacité à communiquer des savoirs que les rôles de construction et d'appropriation des savoirs joués par la rédaction sont souvent minimisés. Il s'agit ici d'exploiter au maximum ce que permet la rédaction pour l'apprentissage. Le rapport personnel au savoir devient plus riche puisque l'élève lui-même formule les savoirs en jeu issus de ses observations (rien n'empêche alors dans un second temps, comme le propose le groupe SOC une institutionnalisation par l'enseignant). Les activités proposées par le groupe SOC tentent donc de diminuer la difficulté classique d'expansion d'un texte de cours fourni par l'enseignant, relevée par Baudry et al. (1998). Comme le signalent ces auteurs (le fait qu'ils évoquent le collège ne change rien), **"la majeure partie des énoncés écrits qui construisent l'objet de savoir est du ressort du professeur dont le texte de leçon ou le résumé est, dans la plupart des cas, déjà préparé. L'écrit personnel de l'élève, relatif à ce qu'il est en train d'apprendre, tient peu de place face à l'écrit magistral"** (p. 49)²². Pour apprendre les savoirs d'habitude condensés par le professeur, l'élève doit pouvoir lever les implicites qu'il contient, être capable d'en comprendre la signification, et il nous paraît intéressant de tenter d'inverser quelque peu la chronologie des écrits respectifs de l'enseignant et de l'élève en faisant précéder l'institutionnalisation de l'élaboration commune, avec l'appui de l'écrit, de tout ou partie de ces savoirs *par les élèves*.

Il est remarquable de constater que l'écrit "de création" occupe traditionnellement une place assez faible, en particulier dans les disciplines autres que le français. **"Il s'agit le plus souvent d'un écrit de copie consistant à reproduire des énoncés qui ne sont pas le fait de l'élève (recopier ce qui est écrit au tableau ou prendre sous la dictée un résumé du maître) et non pas d'une tâche d'écriture conçue comme une "situation-problème". D'une manière générale, l'écriture est perçue uniquement comme support de la formulation à retenir par l'élève et non comme un moyen d'appropriation des savoirs"** (Baudry et al, 1998, p. 27) alors qu'on peut penser que

²² Comme on le verra plus loin, on pourrait dire la même chose au sujet des activités expérimentales menées par les élèves, quasiment toujours décidées par l'enseignant.

"toute reformulation, si minime soit-elle, produit une modification de l'univers de référence sur le plan cognitif " (Baudry et al, 1998, p. 49). Par les activités qu'elle propose, la progression que nous présenterons tente de remédier à cet état de fait. Il ne faut pas négliger non plus l'apport d'une telle démarche pour la maîtrise de la langue (pas seulement disciplinaire) et pour la réflexion permise au sujet du sens que prennent les mots scientifiques (voir partie C). Tout ceci ne fait qu'accréditer davantage une telle méthode.

Bien sûr, une telle démarche impose de laisser du temps aux élèves pour interagir oralement et leur permettre de tâtonner et d'essayer de s'approcher de la meilleure formulation pour aboutir finalement à une rédaction qui leur paraît être la meilleure qui soit. Les observations que nous avons pu faire montrent combien il est indispensable de leur laisser ce temps qui est un temps de vraie réflexion sur les phénomènes et concepts étudiés. De plus le temps passé à ce type d'activité est gagné sur le temps que l'enseignant ne passe pas systématiquement à institutionnaliser puisque cette institutionnalisation est souvent proposée dans l'heure suivante la structure de classe entière étant plus adaptée à cette phase d'institutionnalisation. Nous verrons que cette phase consiste justement à reprendre les écrits des élèves et à laisser finalement une trace commune pour tous grâce à un document que nous appellerons le "cahier de l'élève".

V.1.3 Permettre à l'élève d'exploiter ses capacités sensorielles

L'analyse phénoménologique du chapitre I a largement montré que certaines caractéristiques des phénomènes sonores étaient accessibles par d'autres canaux sensoriels que le seul canal auditif. Les informations recueillies par l'un ou l'autre des sens ne sont pas de même nature et peuvent s'avérer complémentaires. Il paraissait indispensable d'utiliser ces possibilités au maximum si, comme c'est le cas, l'ancrage dans l'expérience est pris pour essentiel. Dès que cela est possible et pertinent il est donc proposé à l'élève, pour enrichir sa phénoménologie des sons de regarder ou de toucher sans oublier d'écouter dans la plupart des cas. Pourquoi par exemple s'interdire de toucher la membrane du haut-parleur lorsque la vibration n'est plus observable ? L'intérêt que cette action présente sur l'établissement d'un lien entre perception auditive et vibration matérielle vaut largement d'encourir le faible risque de dégradation du haut-parleur parfois invoqué dans les lycées.

Il n'est pas question de nier ici la difficulté qui continue d'exister quant à la modélisation et à la conceptualisation généralisante des perceptions. Les "visualisations" du son ne prennent par exemple pas forcément sens facilement pour l'élève et la compréhension de ce qui est vu nécessite dans bien des cas un détour par le monde des théories et des modèles. Quoi qu'il en soit les modalités multiples de perception enrichissent la représentation phénoménologique du monde sensible et ceci est manifeste lorsque, comme c'est le cas pour le sujet qui nous intéresse, il s'agit entre autre de faire le lien entre des perceptions auditives et des événements mécaniques qu'il faut se donner les moyens d'observer par d'autres canaux sensoriels.

V.1.4 Permettre l'activité de modélisation

Les séquences élaborées collectivement au sujet du son, décrites dans le chapitre suivant, donnent une place essentielle à l'activité de modélisation. Nous donnons ici les éléments d'ordre théorique qui permettent d'en comprendre la raison. Il s'agit seulement de se donner quelques repères épistémologiques au sujet des modèles et de la modélisation dans une stratégie d'élaboration de séquences d'enseignement. Des exemples concrets de modèles et d'utilisation dans des séquences d'enseignement seront donnés dans le chapitre suivant (§ IV.4).

V.1.4.1 Première approche de la modélisation

La physique a cette particularité, parmi d'autres sciences, de construire et d'utiliser des modèles. Si nous considérons comme S. Bachelard (1979) que le modèle est un "intermédiaire à qui nous déléguons la fonction de connaissance" et que la physique est la science d'un possible compatible avec les apparences, alors une description minimaliste de l'activité de modélisation consiste à considérer que le monde des objets et des événements peut être interprété (et dans certains cas prédit) par le monde des théories et des modèles, fabriqués par le physicien et regroupant les lois, les principes fondamentaux de la physique (avec le formalisme mathématique inhérent), mais aussi les paradigmes de la communauté (Kuhn, 1983). Dans la typologie des modèles fournie par Walliser (1997), nous laissons ici de côté les modèles *physiques* (traduisant les phénomènes sous forme de représentations concrètes ou analogiques²³) pour ne considérer que les modèles *symboliques* exprimés dans des langages plus ou moins formalisés allant du langage naturel aux formules mathématiques en passant par les représentations iconiques.

Littéralement, l'acte de *modéliser* consiste à passer du monde des objets et événements au monde des théories et des modèles. Cependant il paraît illusoire de ne construire un modèle plus ou moins formel qu'à partir de ce qui est donné à voir. Les "théories" naïves, les structures conceptuelles ou causales "quotidiennes", ou encore la connaissance de modèles dans d'autres domaines interviennent dans l'acte de modéliser, aussi bien pour le novice que pour l'expert (avec leurs outils conceptuels respectifs). En conséquence, il nous paraît essentiel de considérer que l'activité de modélisation implique en fait des aller-retours constants entre les deux mondes (figure V.1-1) Ce sont ces aller-retours qui pourront enrichir le modèle par confrontation et nous considérons finalement à la suite de Tiberghien (1994) que toute mise en relation entre différents niveaux de modélisation constitue une activité de modélisation, dont il est possible d'établir une grille d'analyse plus fine (Bécu-Robinault, 1997, pp.79-82).

²³ Nous avons vu cependant dans le chapitre II que le savoir à enseigner recourt facilement, sur un sujet comme le son, à des modèles analogiques.

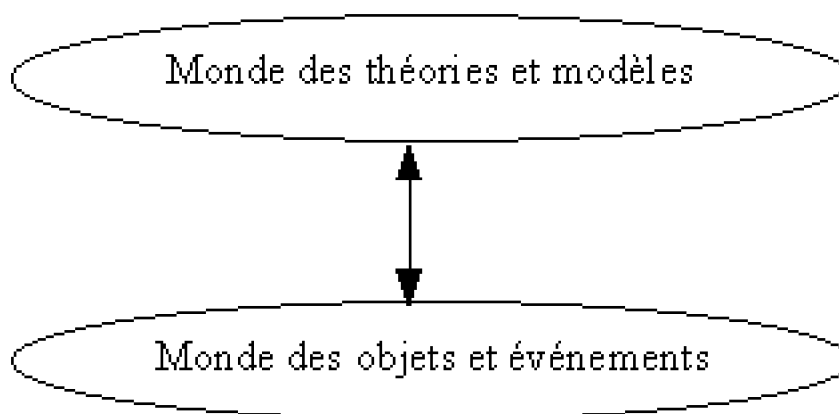


figure V.1-1 : activité de modélisation au sens large

V.1.4.2 Éléments de syntaxe et de sémantique des modèles pour l'enseignement

Walliser (1977) distingue les aspects syntaxique (règles du mode de présentation), sémantique (signification) et pragmatique (utilisation dans un contexte donné) des modèles. L'objectif de ce paragraphe est de donner quelques réflexions théoriques sur la fonction et l'utilisation des modèles dans l'enseignement. Nous envisageons surtout ici, de façon très générale, quelques aspects syntaxiques et sémantiques et nous évoquerons plus largement l'aspect pragmatique des modèles lorsque nous les détaillerons pour le domaine d'enseignement qui nous intéresse.

Domaine de validité et de pertinence d'un modèle D'un point de vue épistémologique, et ceci y compris hors du cadre de l'enseignement, un modèle possède deux caractéristiques essentielles : il est à la fois théorique et fonctionnel. Ces deux points font émerger un domaine de fonctionnement (ou de validité) plus ou moins large, qui regroupe l'ensemble des phénomènes pouvant être interprétés par ce modèle ou sur lesquels, comme dit Martinand (19XX), le modèle peut se projeter. Ceci ne veut pas dire pour autant que le modèle est préalable au champ expérimental. En effet, ce domaine de validité visé influence à son tour le caractère théorique du modèle. Cette "théorie" devra être exploitée, simplifiée et on devra en pratiquer une réduction devant permettre d'en sélectionner certains aspects en référence à ce que l'on veut modéliser. Dans une approche expérimentale, c'est donc aussi *à partir des objets et des événements*, que ceux-ci relèvent de la physique ou de la vie quotidienne, que l'on construit les modèles. On se heurte de fait à une difficulté majeure, relevée par Bachelard (1979), dans le passage d'un champ limité par un choix de propriétés à un champ global synthétique qui permettrait de dénouer la complexité des apparences. N'oublions pas que le modèle a une fonction d'abstraction du réel, en ce sens qu'il ne représente pas les propriétés du réel mais seulement *certaines* propriétés (Bachelard, 1979). C'est le modèle, dans un contexte théorique donnée, qui décide si oui ou non un phénomène appartient à son champ de validité. Si on peut estimer pouvoir décider du champ de validité par une

bonne connaissance du modèle (et champ des possibles au niveau expérimental), hors de tout contexte didactique, le champ de pertinence, par contre, est délimité en référence à l'apprentissage. Le modèle doit être pertinent en *référence* à l'interprétation *par l'élève* d'un phénomène du point de vue du modèle ou des concepts qu'il véhicule. La pertinence est finalement définie par la capacité que l'élève a d'utiliser efficacement le modèle. Des expérimentations de type didactiques semblent alors nécessaires pour évaluer cette pertinence du modèle pour un phénomène donné. Par exemple, M. Méheut (1996) vérifie que le modèle particulière qu'elle propose pour des situations bien déterminé, est également pertinent pour permettre à l'élève de faire des prévisions ou d'expliquer d'autres situations. Le domaine de pertinence est généralement inclus dans le domaine de validité du modèle (défini lui en référence à la physique et au cadre théorique dans lequel il est utilisé). Cette pertinence, pour être étudiée, nécessite de prendre en compte les théories spontanées de l'élève qui vont entrer en interaction avec les modèles proposés par la physique et pouvoir ainsi perturber leur pertinence supposée.

Utilité du modèle et capacité à évoluer En plus de cette fonctionnalité, un modèle doit apparaître utile d'un point de vue de l'élève. Cette utilité semble difficile à obtenir, par exemple avec un modèle particulière (Méheut, 1996), lorsque les questions soulevées sont limitées. Une des raisons mises en avant par Tiberghien et Megalakaki (1994) pour expliquer que l'élève ne perçoive pas facilement l'utilité du modèle est qu'il est plus facile à l'élève d'adapter son propre modèle spontané pour le rendre compatible avec chaque nouvelle situation expérimentale que d'adopter un cadre général d'explication du monde. Ceci pose également la question plus large du mode d'introduction du modèle dans une séquence d'enseignement en référence aux fonctions qui lui ont été attribuées. Ceci renvoie une fois de plus à l'analyse des théories spontanées des élèves et laisse envisager que les propriétés du modèle que les élèves s'approprient le mieux soient celles :

- qui concernent des domaines quotidiens pour lesquels ils n'ont aucune interprétation simple qui les satisfasse ;
- qui ne vont pas à l'encontre de leur théories spontanées.

Signalons à ce stade que le modèle peut acquérir aussi une certaine utilité dans sa capacité à évoluer. Dans cette approche heuristique, il paraît nécessaire de faire vivre le modèle, i.e. comme le dit Host "de le faire fonctionner et de procéder à des simulations, pour éviter la dégradation du modèle en un objet dogmatique, faussé par des analogies douteuses, trop rigide pour s'appliquer à des champs conceptuels nouveaux" (Host, 1989). Il conviendra alors de proposer des situations pour lesquelles le recours au modèle sera fructueux mais aussi de proposer des simulations quand ce sera possible. Nous en proposerons une pour l'un des deux modèles étudiés. Dans cette approche dynamique, il est aussi remarquable de constater que des éléments globalisants d'un modèle, lorsqu'ils sont maîtrisés et couramment utilisés constituent

une grille de lecture et d'observation du monde des objets et des événements. Des objets techniques complexes intègrent alors le champ expérimental et les "phénoménographies", descriptions empiriques mais largement conceptualisées (Martinand, 1992) ouvrent ainsi la porte à l'élaboration de nouveaux modèles.

Prévision, interprétation, représentation Un modèle peut également apparaître utile si l'utilisateur potentiel perçoit qu'il peut grâce à lui expliquer et/ou prévoir. Des activités de prévisions relatives à des phénomènes doivent donc pouvoir être proposées pour espérer que le modèle apparaisse utile dans un premier temps, construisse du sens dans un second temps. Ceci contraint bien évidemment les situations empiriques et/ou expérimentales proposées en référence au modèle, aussi bien celles à prévoir que celles à interpréter. Il ne faut pas non plus oublier que les modèles, basés sur des descriptions reconstruites et conceptualisées, assurent une fonction de représentation des objets et des événements essentielle dans une stratégie d'enseignement de la physique, science dont le recours au symbolisme (formel, graphique, schématique) est énorme. Une prise en compte concrète de la pluralité des ces fonctions sera présentée au paragraphe VI.2.

Modèle et savoir à enseigner Enfin, une contrainte forte, liée au curriculum, peut peser sur le modèle. L'écart entre savoir savant et savoir à enseigner, au niveau du secondaire tout au moins, empêche l'utilisation de modèles proches des théories physiques bien formalisées dont ils ne seraient que des "simplifications". Il s'agit plus souvent de repenser la physique par une analyse fine des savoirs en jeu mais également du champ expérimental qui va servir de référence, en faisant en sorte qu'il soit le plus proche possible du domaine de fonctionnement et de pertinence du modèle à construire. Finalement, le modèle peut-il exister seul, doit-il répondre à des situations-problèmes spécifiques ? Bachelard (1979) affirme que le modèle à finalité pédagogique est toujours local, sans possibilité de prolongation. Pour tenter d'inventer cette prolongation nous pouvons cependant ici nous poser la question de la pertinence du modèle en référence à ce qui nous intéresse, la compréhension des phénomènes sonores dans leur ensemble. Mais la transversalité des concepts en jeu (cf. § II.2.2.6.) peut permettre d'espérer une évolution des modèles proposés pour d'autres champs phénoménologiques (nous pensons par exemple au modèle microscopique de la propagation du son qui peut servir de base à l'interprétation de phénomènes qui ne sont pas liés à l'acoustique). C'est sans doute là un défi à relever.

Ces premiers éléments d'analyse des modèles, de leur rôle ou de leur utilité dans des stratégies d'enseignement prennent peu en compte l'activité et les structures conceptuelles des élèves. Nous ne la négligerons pas pour formuler les hypothèses, que nous explicitons dans le paragraphe suivant, sur le rôle de la modélisation dans l'enseignement et l'apprentissage.

V.1.4.3 Hypothèses au sujet de la modélisation

Une de nos hypothèses majeures est que **l'activité de modélisation pratiquée par**

l'élève tend à favoriser l'apprentissage de la physique et des concepts que la physique met en jeu pour interpréter le monde des objets et des événements (Tiberghien, 1994). En conséquence, l'élaboration de séquences d'enseignement doit permettre à l'élève de mettre en relation les différents niveaux de modélisation. Nous précisons un peu plus loin des hypothèses supplémentaires au sujet des conditions favorables pour rendre ces activités les plus efficaces possibles.

Cette première hypothèse est maintenant partagée par une grande partie de la recherche en didactique. Les modèles ont fait leur entrée (en apparaissant comme tels) dans le champ scolaire depuis quelques années, suite à quelques recherches antérieures en didactique qu'il est possible de dater, en France, de la fin des années 80 (Weil-Barais et Lemeignan, 1990 ; Chomat et al., 1988). Pour éviter de poser le modèle en objet de savoir dogmatique, qu'il suffirait de transmettre comme un type particulier de savoirs intelligibles, la question s'est alors vite posée, non pas de l'écriture de "bons" modèles didactiques, mais des **"moyens de transformer les contenus et les activités d'enseignement et d'apprentissage pour développer une maîtrise de la modélisation comme attitude et démarche intellectuelle utilisant certains outils"** (Martinand, 1992, p.9). Cette démarche oblige à ancrer les activités de modélisation dans le concret de la situation d'enseignement et d'apprentissage. Martinand (1992) distinguent trois types d'analyse possible à la suite de cette démarche (épistémologique, psychologique et pédagogique). Nous reprenons, à quelques nuances près, en insistant davantage sur certains points et en les reformulant en fonction de notre contexte théorique, ces types d'analyses que nous estimons nécessaires pour élaborer des séquences d'enseignement impliquant modélisation.

1.

Une analyse centrée sur les savoirs disciplinaires en jeu, sur la fonction et le champ de validité des modèles proposés. Nous détaillons particulièrement ce point dans le paragraphe suivant (§ V.2).

2.

Une analyse centrée sur l'ingénierie didactique mise en place pour rendre efficace la modélisation dans un ensemble cohérent et varié d'activités et de contenus. Par exemple le problème peut se poser du mode d'introduction didactique du modèle pour favoriser l'activité de modélisation chez l'élève. La littérature didactique donne quelques possibilités pour l'introduction des modèles (Bécu-Robinault, 1997, pp. 70-73) :

- situation-problèmes créant le besoin de modèle puis imposition ;
- construction progressive du modèle avec des expériences variées ;
- imposition d'un germe de modèle puis construction progressive par passage par le champ expérimental ;
- simulations informatiques pour "concrétiser" le modèle.

Dans bon nombre de travaux, que ce soit sur l'énergie ou sur les propriétés de la matière, les modèles sont explicités. Qu'ils soient coélaborés avec les élèves ou imposés par l'enseignant, cette mise en texte (et éventuellement en image, ce qui pose le problème supplémentaire des registres sémiotiques utilisés (Duval, 1995)) des modèles paraît en effet essentielle pour leur utilisation, leur éventuelle évolution future et la séparation des deux modes de description des phénomènes (phénoménologique et modèle) (Méheut et al., 1994). Rien n'empêche alors dans un second temps d'en proposer une simulation permettant la représentation par exemple purement graphique. Quel que soit le mode d'introduction, et dans la continuité de certains travaux (par ex. Tiberghien, 1996, Méheut, 1996), il nous paraît indispensable de **rendre le modèle (ou un germe de modèle) explicite pour l'élève et de le présenter comme tel**, ce qui constitue une autre hypothèse fondamentale.

3.

Enfin, ce qui est plus rarement traité, **une analyse centrée sur l'élève** : quels sont les modèles spontanés, les structures conceptuelles et la phénoménologie quotidienne qu'il est possible de repérer, quel est l'écart par rapport au modèle de la physique et au savoir à enseigner, quel type d'articulation est-il possible de dégager, quelles sont les caractéristiques des activités de modélisation de l'élève ? Notre travail de recherche s'inscrit dans la prise en compte de ces différentes problématiques pour concevoir et se donner les moyens d'analyser les activités de modélisation. Un premier pas dans cette direction a été fait au regard des résultats de la recherche sur les connaissances initiales au sujet du son (chapitre III). Ceci nous semble encore loin de répondre à une problématique générale qui doit analyser plus attentivement les modèles et théories spontanées (mais aussi les modes de description du monde adoptés par les élèves) en référence à un champ empirique large et quotidien, mais également se placer dans une approche développementale pour étudier l'effet d'activité de modélisation dans un contexte plus large que celui de la seule résolution de problème. La partie C, qui constitue le coeur de notre expérimentation tente de contribuer à cette entreprise en donnant des outils et des méthodologies d'analyse. Une telle approche demande aussi, même si nous le ferons moins, de se donner les moyens de pouvoir analyser attentivement les activités de modélisation de l'élève et la façon dont il utilise (ou reconstruit) le modèle (Tiberghien, 1994). Ceci permet de mieux appréhender l'influence du degré de compatibilité entre modèle spontané et modèle proposé par l'enseignement, compatibilité dont la faiblesse peut être un frein important à l'apprentissage.

L'ensemble de ses angles d'analyse constitue donc un cadre théorique fort pour la construction des séquences au sujet du son. Les trois types d'analyse s'enrichissent mutuellement et si une analyse du savoir disciplinaire est nécessaire pour débattre des points 2 et 3, à l'inverse, les problèmes soulevés dans ces deux points **nécessitent et enrichissent une analyse des savoirs disciplinaires** (point 1). Il ne s'agit pas forcément de remettre en cause les contenus disciplinaires, mais de les réorganiser et d'en faire émerger les concepts fondamentaux au regard des analyses précédentes. Une telle analyse est effectuée en particulier dans le paragraphe suivant V.2.

V.2 Analyse du savoir à enseigner en terme de modèles et d'objets et événements

Nous tentons ici de caractériser et de repérer les modèles qui peuvent être dégagés dans le cadre du savoir à enseigner institutionnel. Nous excluons cependant de notre champ d'investigation l'acoustique géométrique et l'acoustique musicale.

Cette analyse s'inspire des réflexions déjà exposées sur différents sujets :

- les perspectives d'enseignement et d'apprentissage basées sur l'activité de modélisation, dont les problématiques théoriques ont été décrites dans le paragraphe précédent ;

- les caractéristiques des phénomènes sonores et les phénoménologies quotidiennes qui peuvent en découler, exposées au chapitre I ;

- les conceptions déjà identifiées chez les apprenants, dont un rapide panorama a été dressé au chapitre III.

La classification qui va suivre ne se veut pas figée mais nous paraît un cadre d'analyse opératoire du savoir à enseigner en terme de modélisation.

V.2.1 Une théorie éloignée de l'acoustique

Nous ne précisons pas le champ théorique sous-jacent en reprenant à notre compte le point de vue de Walliser (1977) qui voit les modèles comme des **"médiateurs entre un champ théorique dont [ils sont] une interprétation et un champ empirique dont [ils sont] une synthèse"** (Walliser, 1977, p.153). Le champ théorique est alors **"formé de l'ensemble des modèles théoriques compatibles avec [un modèle donné], en allant jusqu'aux principes logiques qui sous-tendent le modèle"**. Dans le cas du son, nous pouvons alors considérer que ce qui relève de la théorie est proche du paradigme acoustique en physique (physique ondulatoire, point de vue eulérien...) et comporte surtout tous les grands principes de physique qui peuvent être utiles dans le domaine (conservation de l'énergie, interactions fondamentales, lois de la mécanique...). Ainsi, il est extrêmement difficile d'identifier une théorie *propre* à l'acoustique, des principes d'acoustique comme on peut identifier des principes de physique qui fondent les paradigmes en cours. Même les équations fondamentales de la mécanique des fluides ou des ondes (avec lesquelles, comme nous l'avons vu au chapitre II, le savoir à enseigner a peu à voir) dérivent de principes de physique plus généraux. Ces quelques grands principes de physique qui fondent l'acoustique (loi de la mécanique et de la thermodynamique essentiellement) ne semblent pas envisageables pour un savoir élémentaire à enseigner. Ainsi, pour le savoir à enseigner, nous ne pouvons identifier que des modèles dans lesquels sont contenus les savoirs conceptuels et globalisant.

Ainsi, si nous nous posons la question d'un niveau "supérieur" au modèle, il nous paraît intéressant d'observer le point de vue de Martinand (19XX), qui n'est plus seulement celui du savoir, mais qui cherche à intégrer les éléments théoriques sur la modélisation dans l'enseignement. Il intègre ainsi dans un niveau supérieur des éléments qui ne sont plus seulement des connaissances disciplinaires mais il pose le problème des "enjeux et des formats de la connaissance, c'est-à-dire des formes de rationalité et d'objectivité, des outillages mentaux, graphiques, langagiers, mathématiques ou théoriques pour penser et communiquer". Ce nouveau "registre", que Martinand appelle la "matrice cognitive" inclut les théories mais aussi par exemple les limites et le champ de validité des modèles, les liens réciproques avec les tâches envisageables, les outils graphiques et langagiers et les "paradigmes épistémiques". Il est important de souligner que si ce point de vue est en effet pertinent pour *"les niveaux d'enseignement où les modèles ne sont pas sous la "juridiction" de théories formalisées"* (Martinand, 19XX, p.10), il ne nous semble pas de même nature que ce que nous avons appelé de notre côté monde des objets et événements et monde des théories et modèles. Il nous semble alors évident qu'en analysant le savoir, en dégageant des modèles et en tentant de les caractériser, nous donnerons des exemples concrets d'éléments de cette matrice cognitive.

V.2.2 Variété et description des modèles et des domaines expérimentaux

Dans un premier temps, nous nous contentons de ne préciser que les modèles et les domaines expérimentaux que nous pensons pertinents pour analyser les savoirs et l'activité des élèves dans le contexte de la classe de seconde. On peut alors dégager quatre modèles opératoires et quatre domaines expérimentaux, comme il est mentionné sur la figure V.2-1:

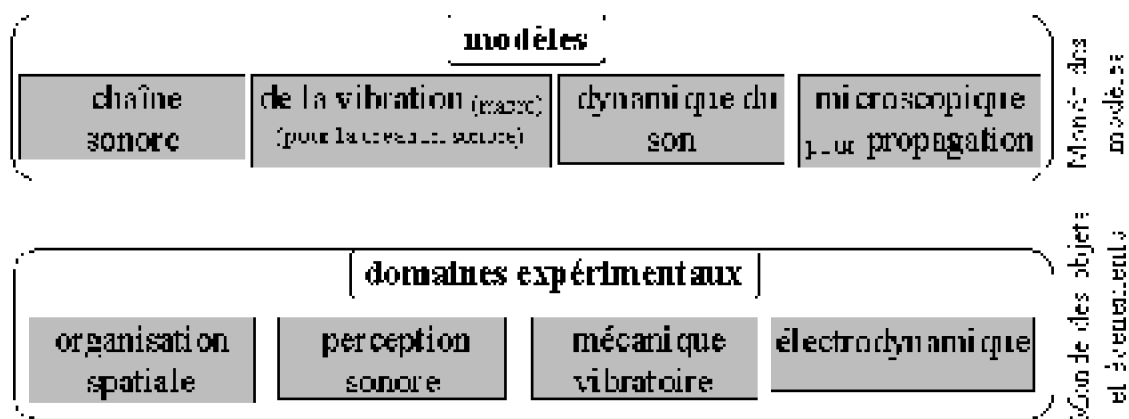


figure V.2-1 : modèles et domaines expérimentaux dans le cas du savoir à enseigner au sujet du son (il n'y a bien sûr aucune correspondance a priori entre domaine empirique et modèle en regard sur cette figure)

Il n'y a pas de séparation complète entre les modèles et certains éléments de savoirs peuvent être partagés. On pourra ainsi avantageusement utiliser des savoirs du modèle vibratoire macroscopique (les concepts *fréquence* et *amplitude* par exemple) pour comprendre le modèle microscopique. Sans parler de hiérarchie dans les modèles

présentés, il peut y avoir emboîtement d'un modèle dans un autre ou tout au moins recouvrement entre plusieurs modèles. Une même situation peut également être interprétée par deux modèles différents. C'est tout l'intérêt de la séquence d'enseignement de pouvoir, par les problèmes soulevés à partir d'une situation donnée, de pouvoir orienter vers un modèle et/ou vers un autre. Dans une situation simple de propagation, on peut par exemple choisir de s'intéresser aux mécanismes de la propagation (le modèle particulière sera alors *a priori* pertinent) ou à la vitesse à laquelle le son se propage (plutôt modèle de la dynamique du son).

Il n'y a pas non plus de cloisonnements stricts entre les domaines expérimentaux que nous distinguons. Bien sûr, un seul monde sensible est proposé à l'observation et à l'interprétation. L'analyse du chapitre I a permis de mettre en évidence la richesse et la diversité de ce qui est donné à observer. La physique, en introduisant des appareils techniques et en organisant des situations expérimentales complexifie un peu plus le monde des objets et des événements. Cependant, à l'intérieur de ce monde perceptible, la physique sélectionne ce qu'il y a à "regarder" et focalise son attention sur l'un ou l'autre (ou plusieurs) de ce que nous avons donc appelé des domaines expérimentaux. Pour le son, on peut par exemple, selon les phases d'enseignement considérées, prendre en compte l'utilisation des appareils électriques (et la façon dont ils sont réglés) comme *pertinente pour la situation*. Ou bien si l'élève s'intéresse à la propagation du son, c'est l'organisation de l'espace qui devient pertinente (distance entre émetteur et récepteur, milieu de propagation, présence d'obstacles). On peut, pour une même situation, privilégier tel ou tel domaine expérimental. Cette classification, basée sur la *pertinence a priori*, participe bien évidemment d'une première conceptualisation, dont le détour par le monde des modèles est manifeste. Il est donc important de spécifier que cette classification est une reconstruction du chercheur et n'est pas réalisable en l'état par l'élève pour lequel, au début en tous les cas, tout est dans le monde réel de façon similaire sans discrimination consciente de ces domaines. Ce référent empirique dont nous donnons quelques éléments dans le tableau V.2-1 est celui de la discipline et comme le dit Martinand, la phénoménologie qui y est attaché est **"évidemment affectée par l'emploi d'un modèle connu"** (Martinand, 1987, p.41). La partie C aura en particulier pour objectif d'étudier la phénoménologie de l'élève, *a priori* bien différente.

Tableau V.2-1 : tentative de délimitation des domaines expérimentaux

domaine expérimental	Objets, événements concernés	Commentaires
perception sonore	Sons perçus Note, tonalité, hauteur sensation émotions...	Ensemble événements auditifs, y compris les émotions ressenties.
organisation spatiale	Distances milieu de propagation murs, obstacles...	Situation sous son aspect statique. C'est de l'organisation spatiale, à l'équilibre, qu'il s'agit.
objets vibrants	vibration de l'émetteur phénomènes qu'on peut toucher et voir	Situation sous son aspect vibratoire. On est hors équilibre.
transducteurs électromécaniques + appareils électriques	Microphone oscilloscope amplificateur sonomètre ordinateur	On inclut dans cette catégorie les objets/outils qui permettent de créer un son à partir d'un signal électrique, de transformer un son en un signal numérique ou analogique afin de "voir" tout ou partie du son pour étudier un son et ses caractéristiques.

Modéliser consiste donc ici à établir des relations qui peuvent être complexes entre domaines expérimentaux et modèles. Pour une compréhension de la physique élémentaire du son, des liens entre modèles entre eux et entre domaines expérimentaux entre eux sont aussi nécessaires.

Pour préciser la façon dont nous caractérisons ces modèles et ces domaines expérimentaux, nous donnons les deux tableaux suivants des concepts ou des objets / événements (selon le cas) qui nous semblent s'y rapporter. Dans le tableau V.2-2, les concepts fondamentaux du modèle (2^e colonne) sont ceux qui sont nécessaires à la détermination complète du modèle et à sa cohérence. La troisième colonne regroupe les concepts du savoir à enseigner curriculaire qui peuvent s'y rapporter (avant aménagements). La comparaison des deux colonnes est donc un bon moyen de voir ce qui est retenu comme essentiel et/ou modifié par le savoir à enseigner, sous différentes contraintes que nous avons déjà décrites (chapitre II). Ces indications sont données à titre indicatif et ne sont pas déterminées de façon stricte et définitive.

Tableau V.2-2 : concept fondamentaux des modèles

Modèle	Concepts fondamentaux du modèle		Concepts du savoir à enseigner
Modèle de la chaîne sonore	Émetteur Milieu (support) Récepteur		les mêmes
Modèle de la vibration pour la création sonore	Mouvement d'aller-retour Vibration Fréq./période	Amplitude Surface vibrante Forme ou motif de la vibration	Vibration Fréquence / période
Modèle particulière pour la propagation du son	Mouvement particulière Mouvement de va et vient Interaction Milieu matériel État de l'air	Propagation de proche en proche des zones comprimées Longueur d'onde	Déplacement de proche en proche du milieu matériel Vibration du milieu Pas de transport de matière Variation de pression Déplacement des part.
Modèle de la dynamique du son (permet de décrire et d'interpréter de nombreuses situations courantes mais ne peut être complet qu'en utilisant des éléments des deux précédents modèles)	Déplacement et vitesse du son	Interaction avec les objets matériels	Déplacement et vitesse du son Réflexion, absorption

Les deux modèles "vibratoire pour la création sonore" et "particulière pour la propagation" feront l'objet d'une mise en texte précise dans le chapitre VI. Il sera également donné des éléments de sémantique et de pragmatique de ces modèles dans le cadre de situations réelles d'enseignement. Le modèle particulière sera surtout largement développé et aménagé dans le dernier chapitre de ce travail puisque nous en proposerons une simulation.

Ces deux modèles nous paraissent fondamentaux dans la mesure où ils sont susceptibles de mettre en oeuvre des notions fondatrices (Baker et Tiberghien, 1999) plus ou moins avérées : c'est le cas pour la vibration qui d'une part a une signification au sens commun, d'autre part est une notion fondamentale (pour la physique) qui semble faciliter

l'acquisition des savoirs élémentaires sur le sujet ; pour le modèle de la propagation du son, il est possible d'identifier plusieurs notions fondamentales (propagation, onde, longueur d'onde, séparation espace-temps) mais nous verrons dans la suite de la discussion qu'il n'est pas évident de savoir quelles notions sont réellement fondatrices, au sens où elles faciliteraient l'apprentissage du domaine.

Chapitre VI Un enseignement expérimental favorisant la modélisation : le travail du groupe "SOC".

VI.1 Présentation du groupe SOC

VI.1.1 Contexte et objectifs

Le groupe SOC (pour *Sons Optique Chimie*) s'est constitué en septembre 1996 à l'initiative conjointe de onze professeurs de sciences physiques de la région lyonnaise, de quatre chercheurs en didactique des sciences physiques (équipe COAST de l'UMR GRIC, CNRS/université Lumière Lyon 2), ainsi que des IPR de sciences physiques de l'Académie de Lyon. L'ensemble de ces acteurs fait alors partie de ce qui s'appellera alors le groupe SOC. L'existence de ce projet de recherche - développement a été rendu possible grâce au financement de la MAFPEN²⁴ de Lyon, pendant une durée de 3 ans. Le groupe a donc cessé d'exister de façon institutionnelle à la fin de l'année scolaire 1999, mais le réseau de personnes et de compétences multiples créé à cette occasion a permis la mise en place d'autres projets.

Le groupe SOC a donc pour première originalité de faire travailler en commun d'une part des praticiens de l'enseignement, d'autre part des chercheurs en didactique et enfin des responsables des contenus pédagogiques enseignés. L'objectif commun à ces différentes catégories professionnelles aux activités d'habitude bien différentes est l'élaboration de séances d'enseignement de la chimie et de la physique au lycée, essentiellement à *caractère expérimental* (donc en séance de Travaux Pratiques), favorisant, compte tenu des hypothèses adoptées, *l'activité de modélisation par l'élève*. Les trois sujets traités (par trois sous-groupes distincts) correspondent aux parties curriculaires suivantes :

- - la partie du programme de seconde consacrée au son ;
- - la partie chimie du programme de seconde ;
-

²⁴ Mission Académique à la Formation des Personnels de l'éducation Nationale, maintenant disparue.

- la formation des images optiques en spécialité de terminale.

Concrètement, il s'agit de mettre au point et de diffuser des séquences de Travaux Pratiques (TP) qui s'insèrent dans une progression qui est elle-même proposée mais dont toutes les séquences ne sont pas forcément établies par le groupe SOC (par exemple, certaines phases d'enseignement en classe entière ne sont pas élaborées par le groupe). Les trois sous-groupes travaillaient en parallèle (en se réunissant une fois par semaine mais également en échangeant les documents en construction ou des idées par courrier électronique) et l'ensemble du groupe se retrouvait régulièrement pour communiquer l'état d'avancement de ces travaux mais également les problèmes rencontrés, quel que soit leur type. Le sous-groupe qui a traité du son, auquel nous avons activement participé, était constitué de 4 enseignants et de deux chercheurs.

Les trois sujets ont été choisis en partie pour leur difficulté d'enseignement affichée par les enseignants, soit lors d'enquêtes (Lestrade et al., 1996), soit lors de discussions privées (à l'occasion de formations organisées par la MAFPEN par exemple). Dans le cas du son, les difficultés des élèves exposées dans le chapitre III ont également motivé le choix.

Enfin, les séquences et documents élaborés ont pu être diffusés auprès des enseignants au moyen de stages de formation continue (généralement deux par année scolaire pour chaque sujet) et du site Internet de l'Académie de Lyon qui lui réserve une rubrique spécifique²⁵.

Les documents fournis par le sous-groupe "son" sont entièrement reproduits en annexe.

VI.1.2 Des compétences multiples et complémentaires pour l'élaboration des séquences

Une originalité de ce groupe et des stages de formation qu'il a animés réside donc dans la collaboration de personnes aux fonctions différentes.

D'une part les séquences sont élaborées en tenant compte des résultats de recherche dont les chercheurs sont les détenteurs. Vu l'ampleur des éléments à prendre en compte et la provenance de ces problématiques, il revenait aux chercheurs du groupe SOC de permettre la prise en compte des résultats et hypothèses de recherche évoqués dans le chapitre précédent. Ils devaient donc pouvoir assurer la communication de quelques grandes lignes du cadre théorique sous-jacent aux enseignants. Par exemple, il peut être fait cas des connaissances initiales des élèves sur un sujet donné ou bien les chercheurs peuvent proposer une méthodologie d'analyse de ces connaissances initiales (ce qui a été fait dans le cas du son), les modes possibles de présentation d'un modèle, etc..

D'autre part, les enseignants apportent leur expérience professionnelle et leurs réflexions et permettent de prendre en compte les contraintes matérielles ou institutionnelles concrètes liées aux situations d'apprentissage scolaire. Les enseignants

²⁵ <http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/docs/soc/index01.html>

peuvent ainsi veiller à la faisabilité des activités projetées, *a priori* et après avoir expérimenté réellement. La pratique des séquences élaborées, sur trois années, a permis de nombreux retours sur les documents élaborés. De plain-pied dans l'ingénierie didactique, cette démarche s'inscrit bien évidemment dans le cadre institutionnel dont les IPR, acteurs du groupe, sont les garants.

VI.1.3 Une prise en compte des connaissances initiales et de l'activité de l'élève

Nous avons exposé au paragraphe V.1.1 les raisons théoriques pour lesquelles il nous paraît essentiel, lors d'un projet d'élaboration de séquence d'enseignement, de repérer les connaissances initiales, la phénoménologie et les "théories" spontanées des élèves concernant le sujet. Nous reprenons bien évidemment à notre compte ces hypothèses issues de la recherche dans le cas du projet SOC. Nous explicitons ici les conséquences concrètes de telles hypothèses, et les contraintes et mécanismes de transfert à des situations réelles scolaires.

Une telle stratégie (issue de la recherche), lorsqu'elle est importée dans le cadre concret d'une classe et d'une progression d'enseignement, subit des contraintes liées par exemple à l'intérêt qu'y trouve l'enseignant et à l'insertion dans la progression. Si l'enseignant choisit par exemple de poser un questionnaire à ses élèves avant d'aborder le thème, il se pose alors le problème du rapport d'un tel questionnaire au savoir à enseigner. L'enseignant peut avoir envie que les questions posées soient le plus possible en résonance avec les contenus à enseigner (i.e. que les savoirs à apprendre puissent permettre de répondre du point de vue de la physique après enseignement) ou que les questions ne paraissent pas trop dures aux élèves (parce que pas assez "cadrées" par exemple).

Un questionnaire fut très tôt élaboré par le sous-groupe pour repérer les connaissances initiales des élèves. Le passage du questionnaire avant le début des séances sur le son imposait la formulation de questions les plus quotidiennes possibles, sans forcément ressembler à des questions "de physique". Cependant, il était fait un effort pour que les situations proposées soient en résonance avec le contenu à enseigner.

D'abord pensé comme un outil pour élaborer les séquences, et en ce sens pratiqué uniquement par les enseignants impliqués dans le projet, ce questionnaire fut finalement, après divers aménagements, proposé au début de la progression et diffusé avec tous les autres documents. D'un outil pour mieux analyser les connaissances des élèves et les confronter au savoir à enseigner, le questionnaire est finalement devenu un élément intégré à l'enseignement, ouvrant et bouclant (souvent) le thème "sons et ultrasons". Nous exposons ci-après les avantages concrets du passage de ce questionnaire, pour le groupe SOC, pour les enseignants adoptant la progression et pour les élèves.

D'abord du point de vue du groupe qui concevait les séquences, le fait que les questions proposées étaient "acceptées" puisque traitées par les élèves a permis très tôt de donner un rôle majeur aux réponses fournies pour amorcer des pistes fructueuses de réflexion pour l'élaboration des séquences.

Ensuite, du point de vue de l'enseignant, concepteur ou "utilisateur" des séquences,

ceci lui permet d'avoir une meilleure idée des connaissances initiales de son public sur un sujet considéré comme quotidien et auquel il peut donc poser un certain nombre de questions avant enseignement. De plus, l'enseignant pouvait ainsi revenir sur certaines questions concrètes du questionnaire au fur et à mesure de l'enseignement quand la situation s'y prêtait. Notons que cette façon d'introduire le sujet fut ici très bien acceptée par les enseignants du fait des renseignements extrêmement importants qui en découlaient.

Enfin, du point de vue de l'élève, ce questionnaire est un moyen de susciter sa motivation et de le faire se poser des questions sur le sujet avant de commencer l'enseignement, et ceci sans la peur d'une évaluation notée (le questionnaire n'est bien évidemment pas passé dans un tel esprit). Le questionnaire écrit aura donc un rôle introductif ce qui n'empêche pas les interactions orales introductives avec le professeur. Si la fonction des questions, par rapport à l'élève, était d'abord de susciter l'interrogation et la curiosité, voire la dévolution, l'élève aura aussi, en fin d'enseignement, la possibilité de voir le chemin parcouru sur le sujet (ou d'observer que les savoirs scientifiques rencontrés ne permettent pas d'expliquer tout, ce qui n'est pas négligeable dans un souci d'une présentation objective de la nature de la science). Certains professeurs, pour favoriser cette auto-évaluation des élèves proposaient d'ailleurs le même questionnaire en fin d'enseignement.

De façon générale, c'est le type même de méthode adoptée pour l'élaboration collective des séquences qui a permis de prendre en compte les activités des élèves, tant au niveau pratique que conceptuel. L'observation par les enseignants (mais également par les chercheurs) dès la première année du projet a permis régulièrement des modifications des documents proposés. Les réponses ou raisonnements classiques ou possibles des élèves étaient communiqués dans les documents d'accompagnement lors de la diffusion des séquences auprès des enseignants.

Signalons enfin que c'est pour tenter de s'affranchir de certaines des contraintes de l'enseignement institutionnel et pour aller plus loin dans telle approche que nous avons entrepris le travail de recherche dont la méthodologie et les résultats vont être exposés dans la partie C de ce travail. On peut en effet poser la question plus large du type de situations quotidiennes qui permettent de dégager les interprétations des élèves à partir desquelles il sera possible d'élaborer des stratégies d'enseignement. Pour ce faire, un autre questionnaire (support de notre recherche) a été élaboré et passé dans quelques classes à la place du questionnaire élaboré par le groupe SOC. Ce questionnaire sort un peu du cadre strict du savoir à enseigner de seconde actuelle en prenant en particulier en compte les réflexions du chapitre I pour s'approcher de la phénoménologie du son en présence chez les élèves.

VI.2 Rôle des activités expérimentales et modélisation

VI.2.1 Position du problème

Dans une logique d'ingénierie didactique, la vigilance des enseignants au sujet de la

faisabilité des expériences ou des activités expérimentales, des modes possibles de présentation des modèles assurait un équilibre fructueux avec des éléments d'ordre plus théorique du chapitre V.

Comme nous l'avons vu au chapitre V, la modélisation est un moyen fructueux d'interpréter le monde des choses, certes, mais surtout de donner du sens aux grandeurs et concepts de la physique, dans leur articulation avec les objets et les événements. Ces activités sous-tendent toutes les séquences proposées par le groupe SOC. Ceci est facilité par le choix que nous avons fait de présenter l'essentiel de la découverte des concepts par l'élève en séances de TP, choix que nous justifions dans le paragraphe suivant.

Cependant, ce choix ne suffit pas pour donner une exploitation efficace des activités expérimentales en vue de la modélisation. Johsua (1989) décrit bien comment les stratégies d'enseignement ont longtemps été pensées en masquant les relations complexes entre expériences et modèles, ce qui tend alors à appauvrir **"la fonction et le contenu du rapport à l'expérimental"** (p.29). L'option inductiviste, en particulier, a entre autre pour effet de restreindre fortement le champ expérimental à quelques expériences prototypiques qui, dans le cas du son, sont relativement facilement identifiables historiquement (cf. chapitre II). De plus, le récent rapport européen "Labwork in science education" a permis de montrer que les objectifs d'apprentissage attribués au TP par l'enseignant sont assez peu variés, et ceci dans les principaux pays d'Europe : identifier des objets ou des phénomènes et les rendre plus familier, apprendre un concept, apprendre une relation, apprendre à utiliser un instrument ou encore apprendre à traiter des données, à les utiliser pour appuyer une conclusion. Apprendre une théorie ou un modèle n'est que rarement fixé comme objectif d'un TP (Tiberghien et al, 1998).

Ces quelques objectifs sont en accord avec ce que les élèves sont effectivement censés faire une fois l'expérience réalisée : en classe de physique il s'agit essentiellement de redécrire directement la ou les observations, d'étudier la relation entre deux quantités, de calculer la valeur d'une grandeur non mesurée elle-même ou de rendre compte d'observations en proposant une explication au regard d'une loi connue. Des activités comme vérifier une prédiction ou faire un choix entre plusieurs explications possibles à l'aide d'une expérience, pourtant essentielles dans une logique de modélisation, ne sont quasiment jamais faites par les élèves au niveau du lycée. De même lorsqu'il s'agit d'inventer un protocole ou de réaliser un objet ou les conditions favorables à l'observation d'un événement (Tiberghien et al., 1998). Les activités expérimentales courantes sont donc extrêmement peu diversifiées. De plus, les stratégies d'élaboration, les protocoles, les choix d'expériences sont quasiment entièrement à l'initiative du professeur.

Pourtant, la physique, science expérimentale par excellence, ne fait pas jouer un rôle unique à l'expérience de laboratoire ou quotidienne. La fonction de l'expérimental dans l'enseignement a été largement étudiée (Johsua & Johsua, 1987, 1988) et le bilan ne permet pas de rendre compte de cette diversité qui est pourtant une richesse tant pour la compréhension de la façon dont fonctionne la science que pour les raisonnements fondamentaux qui en découlent. Les TP ont donc tendance à avoir toujours les mêmes objectifs et à induire un nombre faible de modalités d'exploitation de l'expérience, dans une logique inductiviste qui prédomine encore largement. Rompre avec cette option

inductiviste, c'est ouvrir le champ expérimental (en y incluant le champ empirique) puisqu'il n'est plus question alors de ne présenter que les expériences prototypiques adaptées au modèle à présenter (expérience de monstration ou de renforcement (Johsua, 1989)).

Afin d'enrichir le rôle et les modalités d'exploitation de l'expérience, pour comprendre les enjeux de la physique et pouvoir pratiquer ses méthodes, il convient donc, dans une logique de modélisation :

d'une part de repenser la place des activités expérimentales dans l'institution scolaire, acte dont nous tentons une brève ébauche dans le paragraphe VI.2.2 qui suit ;

d'autre part de diversifier les modalités d'activité menées par les élèves et impliquant une expérience (§ VI.2.3).

VI.2.2 De nouvelles fonctions pour les TP : un dépassement de l'articulation classique cours / TP

Les séquences de TP élaborées par le groupe SOC visent à favoriser l'activité de modélisation, dont l'apport pour l'apprentissage est une de nos hypothèses majeure. Traditionnellement, les aspects les plus "théoriques" du savoir à enseigner, à savoir les modèles, les concepts fondamentaux de la physique à enseigner, les raisonnements fondamentaux sont présentés en "cours", donc en classe entière, que qui induit le plus souvent une présentation relativement magistrale. C'est parce que l'activité de modélisation implique l'articulation de ces savoirs "théoriques" avec des activités expérimentales que le groupe SOC casse cette logique traditionnelle et choisit d'introduire l'essentiel de ce qui est classiquement appelé "cours" en séance de TP. En effet, ces séances donnent la possibilité d'utiliser, de manipuler des objets ou des appareils techniques, de prendre le temps de regarder, d'entendre, de toucher. En ce sens, ces temps scolaires sont les plus propices à l'articulation entre ce qui relève de l'expérience ou du champ empirique et ce qui relève des concepts de la physique (*via* des modèles).

Les séances en classes entières constituent alors le plus souvent des moments où l'enseignant institutionnalise ou revient sur ce qui a été fait en demi-groupe. Cette pratique relativement originale a pu déstabiliser certains enseignants (certaines réactions en stage de formation l'ont montré) qui ne retrouvent plus la structure classique d'un cours en classe entière suivi ou introduit par une séance de TP qui n'a qu'un statut secondaire dans la hiérarchie des connaissances à acquérir. Certes, il est possible de trouver des enseignants présentant des corps de savoirs illustrés par des expériences. Ceci donne généralement lieu à un "TP-cours", expression qui emprunte au cours l'aspect important des connaissances qui y sont vues et au TP l'aspect expérimental des activités qui y sont menées.

Les séquences proposées par le groupe SOC se rapprochent donc de ces TP-cours, dans la mesure où toutes les séances proposées en demi-groupe sont l'occasion de présenter des connaissances fondamentales. Cependant, cela ne signifie pas que dans

l'esprit du groupe SOC, il y a d'un côté les TP-cours et de l'autre les cours classiques en classe entière. Pour cette raison, nous préférons, plutôt que d'adopter la dénomination dialectique classique cours / TP qui est révélatrice d'activités et de fonctions bien différentes, parler de séances en classe entière et séances en demi-groupe. Ce changement de dénomination est bien plus que sémantique. Il révèle le choix fait par le groupe SOC d'une diversification du rôle attribué aux activités expérimentales dans leur articulation avec des savoirs plus théoriques, et d'un ancrage effectif dans l'expérience. Il induit également de nouvelles pratiques d'enseignement, en particulier pour les enseignants acteurs de cette recherche. Par exemple, l'enseignant rend explicite cette articulation entre savoirs "théoriques" et expériences par les séquences et par les documents distribués à l'élève : à la suite des séances en demi-groupe dont le support est un document faisant office de "texte de TP", il est donné aux élèves un document appelé "cahier de l'élève" présentant les savoirs théoriques construits et utilisés au cours de la séance qui vient de s'écouler. L'enseignant est invité à revenir sur ce cahier de l'élève (qui inclut les modèles) lors de la séance suivante en classe entière.

Pour rythmer la progression et classer les séquences, celles-ci seront néanmoins appelées TP (ce sont bien des travaux pratiques au sens où la *pratique* y occupe une place centrale) lors de leur diffusion.

Signalons enfin que, en échos aux réflexions du paragraphe V.1.2 au sujet de l'activités de (co)construction et de formulation des connaissances par les élèves, cette méthode implique des comportements moins "directifs" de l'enseignant pendant les séances en demi-groupe. On se retrouve ainsi dans un fonctionnement du système didactique proche de ce que Tsoupelis (1993) cité par M. Méheut (1998) appelle un état co-didactique, où **"le professeur fait partie du milieu de l'élève et lui offre certains guidage en intervenant le moins possible par rapport aux connaissances visées"**. Ou pour reprendre la catégorisation de Dumas-Carré et Weil-Barais (1998), le professeur assure plutôt un rôle de tutelle en séance de TP (organisation des tâches et guidage éventuel dans la résolution) et un rôle de médiation (négociation des significations et gestion des contradictions) en fin de résolution ou dans la séance en classe entière suivante.

VI.2.3 Diversifier les modalités d'activité impliquant l'expérience

Le groupe SOC a eu pour souci de varier les fonctions attribuées à l'expérience pendant les séances de TP, sans viser la diversité pour elle-même mais en cherchant à exploiter toute expérience à bon escient et dès qu'elle peut permettre d'introduire un concept, d'observer des phénomènes, ou de donner du sens à un modèle par exemple. Rappelons les deux circonstances favorables pour cette entreprise :

d'une part nous nous sommes affranchis des structures classiques (cours puis vérification d'une loi ou illustration en TP) ou (TP présentant une expérience qui permet, par inductivisme, l'introduction de la loi exposée dans le cours suivant). Ici, l'essentiel des notions est introduit en séances de TP ce qui permet un recours à l'expérimental simultané à l'élaboration des savoirs plus théoriques ;

d'autre part le son est un sujet scientifique qui se prête bien à la réalisation d'expériences quantitatives alors que, à un niveau élémentaire, les expériences de ce type sur le sujet sont rares (chapitre II). Ainsi, contrairement à d'autres sujets, il n'y a pas ici d'effet "d'aspiration" du temps didactique par ces expériences quantitatives souvent longues (réglages parfois critiques, prise de données, traitement, méthodes graphiques). Il est alors possible d'envisager un panel plus large de modalités d'utilisation des expériences.

Les séquences que nous proposons permettent ainsi aux élèves de mener des activités variées aussi bien au niveau des objets manipulés que des idées. On pourra pour s'en convaincre se reporter aux annexes où figure l'analyse de cinq des sept TP avec la grille d'analyse du projet européen précédemment cité. Nous exposons ci-après, sans prétention à l'exhaustivité et en nous inspirant de cette grille, les activités dont l'origine et/ou la finalité ont un caractère expérimental, induites par les TP du groupe SOC. Un exemple est donné à chaque fois, ainsi que quelques commentaires quand il nous apparaît nécessaire d'en fournir.

VI.2.3.1 Repérer un événement commun à toute une classe de situations.

Cette activité modélisante ne rompt pas avec un certain inductivisme, qui doit rester une activité scientifique essentielle au milieu d'autres démarches. Il est cependant important de ne pas laisser l'enseignant sélectionner seul (ou par effet Topaze) le phénomène commun à une classe d'expérience aux effets perceptibles communs. Même si la modélisation ne peut pas être réalisée complètement, il s'agit au moins d'induire le besoin de modèle. C'est par exemple dans cet esprit que la première activité expérimentale de la progression SOC consiste à observer (regarder, toucher...) le comportement de différentes sources sonores pour dégager un comportement commun. Du ***"ça vibre pour toutes les sources" au modèle de la vibration sonore en passant par "il y a à chaque fois une partie qui vibre"***, le processus de modélisation peut prendre un peu de temps mais la situation doit laisser la possibilité à l'élève d'aller le plus loin possible dans la conceptualisation de ce qu'il vient de faire et de "sentir" dans le monde sensible.

VI.2.3.2 Confirmer ou infirmer une prédiction effectuée préalablement.

Cette activité est nouvelle pour les élèves et plutôt peu répandue dans l'enseignement (ou alors parfois sous le contrôle total de l'enseignant). Cette démarche scientifique classique nous paraît devoir être pratiquée par les élèves. Il est d'ailleurs remarquable de constater qu'il est très difficile pour les élèves de laisser sur leur feuille de TP une prédiction fausse dans un espace pourtant réservé sur la feuille (il y a par exemple trois cases "prédiction", "observations", "accord ou non ?"). Dans les situations-problèmes proposées, les élèves préféreraient effacer leur prédiction fausse et ne laisser trace que d'une prédiction "vraie" une fois l'expérience réalisée. Pour manifester l'importance qu'il attribuait à une telle activité, le groupe SOC a alors demandé aux enseignants pratiquant ces TP de donner pour consigne d'écrire à l'encre non effaçable. Ceci est révélateur de la pratique classique de l'écrit. L'écrit rend traditionnellement compte de la parole et du savoir dispensé par

l'enseignant, savoir préconstruit et définitif qui ne comporte dans l'esprit de l'élève ni erreur ni inexactitude (cf. § V.1.2).

Dans l'expérience de la sonnette sous vide, il est ainsi demandé aux élèves de prédire ce qui va se passer avant de faire le vide (ce qu'on entend à l'extérieur et la variation de l'indication du sonomètre placé sous la cloche), une fois le vide fait, avec ou sans mousse entre la sonnette et le socle de la cloche.

VI.2.3.3 Imaginer une expérience pour mettre en évidence un phénomène décrit théoriquement

C'est également une activité assez rare dans le secondaire où le choix et les objets utilisés pour l'expérience sont quasiment exclusivement à l'initiative de l'enseignant. Ce processus descendant (du modèle au champ expérimental) est généralement l'occasion de faire jouer à l'expérience un rôle de validation du modèle proposé. Dans les séquences élaborées par SOC, par exemple, il est demandé aux élèves de concevoir une expérience permettant d'illustrer le principe du microphone (dédit de celui du haut-parleur), en ayant rappelé aux élèves le principe du haut-parleur et une expérience l'illustrant.

VI.2.3.4 Imaginer une expérience ou un protocole (pas forcément unique) pour réaliser une tâche pratique.

Nous visons ici le passage quasiment obligé (ou largement facilitateur) par le monde des théories et des modèles pour résoudre la tâche. Par exemple, il est demandé à la fin du TP n°3 de réaliser "le même son" à l'aide d'un diapason d'une part, d'un haut-parleur (et GBF) d'autre part. L'élève peut en tâtonnant tenter de se fier entièrement à la perception auditive (il tente de reproduire le son du diapason par approches successives en jouant modifiant les réglages du GBF) ou bien élaborer un protocole d'expérience pour mener à bien la tâche, ce qui fait faire un aller et retour vers le modèle vibratoire (par exemple il mesure la fréquence du son émis par le diapason et la reproduit avec le haut-parleur).

VI.2.3.5 Faire des liens qualitatifs entre caractères perceptifs (auditivement) et des grandeurs physiques mesurables relevant d'un modèle physique

Il s'agit bien évidemment d'une activité de modélisation qui permet de donner du sens au modèle et de bien distinguer ce qui relève des objets et des événements de ce qui relève du modèle. Par exemple, dans le TP n°1, les élèves sont invités à élaborer une stratégie pour mesurer la *fréquence de vibration* de la membrane d'un haut-parleur à partir de la définition de la fréquence (dans un cas où la fréquence est suffisamment basse pour pouvoir observer le mouvement de la membrane). Dans le TP n°3, une activité expérimentale est proposée pour que les élèves puissent établir le lien entre ce qu'ils perçoivent et les caractéristiques des signaux électriques de la tension d'alimentation du haut-parleur observée à l'oscilloscope.

VI.2.3.6 Permettre l'utilisation d'un modèle pour interpréter l'expérience réalisée pour donner du sens aux concepts du modèle.

Faire vivre le modèle en référence aux objets et événements est également une activité fructueuse tant du point de vue intellectuel que du point de la compréhension par l'élève des éléments du modèle et des liens qu'ils entretiennent entre eux (que ces liens soient qualitatifs ou quantitatifs) et de la façon dont fonctionne la physique. Sans préjuger de la façon dont a été présenté le modèle (modèle imposé ou construit à partir d'un besoin suscité par une activité dédiée), l'élève est alors amené à s'approprier les savoirs présentés dans le modèle pour changer son point de vue descriptif des objets et des événements. Au lieu d'adopter un point de vue purement phénoménologique (plus ou moins construit), il adopte alors les explications que la physique propose *dans le cadre du modèle* pour les événements en question. L'élève doit pouvoir prendre conscience que ce point de vue a un domaine d'application (un champ de validité en réalité) bien plus large que la seule situation étudiée. Dans le cas contraire, l'élève ne voit pas forcément l'intérêt qu'il y a à adopter le point de vue de la physique au détriment de son interprétation spontanée qui peut se limiter à une description suffisante dans bien des cas (mais pas toujours).

Par exemple, un modèle microscopique de la propagation du son (dont nous allons donner une version plus loin) permet de passer d'une description (de façon simplifiée et caricaturale) telle que "le son se déplace parce que je l'entends quelque chose qui est loin de moi, donc il faut bien que ça se soit déplacé" à une description *explicative pour la physique* qui, pour résumer, pourrait être par exemple "le son se déplace parce que la vibration de la source est transmise assez fidèlement de proche en proche aux constituants élémentaires du milieu, ce qui permet au milieu d'assurer la propagation de l'information contenue dans l'événement vibratoire". Ce modèle permet d'expliquer bien plus d'événements que la cause perceptive ("parce que j'entends") qui est elle purement contingente à la question posée. On voit bien également que la nature de l'interprétation change quand on passe d'un niveau à un autre. Nous reviendrons sur la mise en évidence et l'analyse de ces changements de niveau d'interprétation dans l'expérimentation que nous avons menée (partie C).

Notons enfin sur ce point que cette activité d'interprétation du monde des objets et des événements à partir d'un modèle fourni permet dans certaines conditions d'envisager l'écart entre réalité et modèle et de prendre conscience des limites inhérentes à tout modèle.

VI.3 Contenus traités et documents proposés

Après avoir décrit le contexte d'élaboration des séquences proposées par SOC et les démarches adoptées au sujet de la place de l'expérimental, nous focalisons ici notre propos sur la réflexion du sous-groupe qui a traité de la partie "sons" au sujet des contenus d'enseignement. Cette analyse est inspirée de celle du savoir à enseigner en terme de modèles et d'objets et événements que nous avons détaillée au paragraphe V.2. Le travail de SOC s'inscrivant dans un cadre institutionnel, il a fallu ici prendre davantage en compte les contraintes qui relèvent des instructions officielles. En particulier, il a fallu faire des choix au sujet de l'importance donnée à telle ou telle partie de programme, penser à la séquentialisation des concepts fondamentaux qui ont émergé de cette

analyse, à la façon d'introduire les modèles proposés, à l'articulation des séances en demi-groupe ou en classe entière ou encore aux moyens de communications de la progression élaborée à d'autres enseignants.

VI.3.1 Des savoirs annexes minimisés

Sachant qu'une telle entreprise d'élaboration commune de séquences d'enseignement peut être très longue, il était prudent de faire des choix quant aux parties de programme qui devaient être traitées en priorité. Le groupe "sons" a décidé dès le début du projet de se focaliser sur les contenus ayant un rapport clair avec le son et de ne pas traiter ce que nous avons appelé les *savoirs annexes* (cf. chapitre II § 3.3.). On ne trouvera donc pas dans les travaux du groupe, comme on rencontre dans d'autres progressions ou documents d'accompagnement, de séquences de TP entièrement consacrées à la stroboscopie ou à la vérification de la loi de Laplace.

La stroboscopie n'est appréhendée que comme un outil de détermination de la fréquence de mouvements trop rapides pour être observés à l'oeil nu. Elle donne bien sûr l'occasion de mener des activités expérimentales à la fin d'une séance de TP (TP n°2).

Dans le cas de la loi de Laplace, nous avons même fait le choix de ne pas traiter de la formule mais de seulement nous intéresser en TP au principe de fonctionnement du haut-parleur.

Nous avons suffisamment traité de ce sujet dans le chapitre II pour ne pas revenir ici sur les raisons de tels choix.

VI.3.2 Organisation globale de la progression

La progression est organisée autour de 7 TP (respectant en ceci les consignes du programme) au cours desquels les concepts et modèles fondamentaux sont introduits. Nous donnons ci-dessous la chronologie et le sujet des 7 TP seulement.

Activités préliminaires	- Questionnaire - Exercice préparatoire sur la chaîne sonore
<u>TP 1</u> : Les différents éléments de la chaîne sonore	- Sources de son (introduction de fréquence et période d'un son) - propagation (nécessité d'un milieu, différents milieux...)
<u>TP 2</u> : La propagation du son dans l'air. Période, temps de la réflexion du son	- Propagation du son, aspects microscopiques (marchandise, bougie) - Interprétation de la propagation du son dans l'air et dans un gaz (détail) - Mouvement de la membrane du T.E. Lien entre pression et force
<u>TP 3</u> : Deux grandeurs caractéristiques d'un son. Evolution au cours de la propagation	
<u>TP 4</u> : Mesure de la vitesse de propagation du son	- vitesse de propagation dans l'air (détermination expérimentale) - influences numériques - influences des propriétés du son
<u>TP 5</u> : Choix de récepteurs	- micro : fonctionnement, propriétés, sensibilité, BR. - oreille : limite de sensibilité
<u>TP 6</u> : Longueur d'onde : utilisation d'un modèle	- Etudier l'état de l'air avec un miroir - En un endroit donné, au cours du temps - A un instant donné en différents endroits
<u>TP 7</u> : Acoustique musicale : son pur, son complexe, relation entre fréquence fondamentale, vitesse de résonance, niveau d'attaque, analyse spectrale et synthèse d'un son complexe, harmoniques. Utilisation de l'outil informatique pour l'analyse et la synthèse.	

En dehors des séances en demi-groupe, certaines séances en classe entière non mentionnées ci-dessus sont proposées par le groupe SOC. Au premier rang de ces séances, il y a ce que nous pouvons appeler des "cours" au sens où ils consistent à revenir sur les concepts "théoriques" construits lors du TP précédent ; c'est en particulier à cette occasion que l'institutionnalisation des savoirs a lieu. Ces séances en classe entière peuvent aussi être l'occasion de mener d'autres activités : l'évaluation posant souvent problème sur ce sujet, il est ainsi proposé des exercices pour la mener à bien ; le groupe SOC propose également des activités documentaires ou des activités de réflexions en groupe avant ou après un TP donné. La progression, les TP et une description (plus ou moins sommaire) des séances en classe entière qui s'intercalent entre deux TP sont fournis. L'enseignant peut, s'il le désire, ajouter des séances de TP (s'il tient par exemple à faire vérifier $F=kI$) mais il devra le faire alors au détriment de séances de TP de chimie (à ce moment de l'année, la chimie peut éventuellement être davantage traitée en classe entière dont l'occupation par le son est finalement minorée).

Notons que cette progression prend en compte les aménagements de programme

sauf au sujet de l'interprétation microscopique de la propagation du son qui continue à occuper une place essentielle (choix justifié plus loin), ainsi qu'au sujet de certaines suppressions en acoustique musicale. Chacun de ces écarts aux aménagements est soigneusement justifié et argumenté auprès des enseignants.

VI.3.3 Chronologie de l'introduction des concepts

Visant à favoriser la modélisation par les élèves, l'enseignement élaboré prend en compte l'étude préalable du savoir en jeu et des concepts (§ V.2) qui paraissent essentiels pour répondre aux objectifs fixés par les textes officiels. A partir de cette analyse générale il s'opère alors une sélection des concepts qui nous paraissent essentiels pour un apprentissage de la physique élémentaire au sujet du son. Par exemple, dans ce que nous avons appelé le modèle vibratoire pour la création sonore, les concepts *fréquence* et *amplitude* sont privilégiés alors que celui de *surface matérielle* est laissé de côté.

De plus, les concepts ne sont pas introduits au hasard mais au contraire, la chronologie avec laquelle ils interviennent au cours de la progression rend compte de ce qui constitue, de notre point de vue, la structure conceptuelle la plus appropriée à la compréhension du domaine.

Nous mentionnons dans le tableau suivant les concepts introduits (dans l'ordre où ils le sont) avec quelques commentaires et le TP pendant lequel a lieu la centration sur le concept.

Tableau VI.3-1 : chronologie et contexte d'introduction des concepts

Concepts	TP	Commentaires
Chaîne sonore Émetteur Milieu de propagation Récepteur	TP1	Ce modèle de la chaîne sonore consiste à repérer, pour une situation sonore donnée, les éléments du monde des objets qui constituent l'émetteur, le milieu et le récepteur. Cet appariement ne pose généralement pas de problèmes.
Propagation (nécessité d'un milieu)	TP1	
Vibration d'une surface matérielle	TP1	Il s'agit à ce stade de la vibration de la source sonore, qui permet d'associer tout son à une surface matérielle en vibration.
Fréquence et amplitude de la vibration mécanique de la source	TP1	Dans le TP1, c'est uniquement la fréquence et l'amplitude de la <u>vibration mécanique</u> qui sont définies (et mesurée dans le cas de la fréquence). Cependant au fur et à mesure des activités, des distinctions sont faites entre les différents concepts auxquels il est possible d'attribuer une fréquence et une amplitude
Fréquence et amplitude de la vibration des particules du milieu	TP2 repris au TP6	Première approche du modèle particulaire (appelé explicitement ainsi). Ces concepts sont identifiés à ce qu'on appelle alors la fréquence et l'amplitude de l'onde sonore à l'endroit considéré.
Fréquence et amplitude de la tension d'alimentation fournie par un GBF	TP3	Ces paramètres, issus du domaine électrique (cf. §), sont reliés à ceux caractérisant la vibration mécanique dans le cas de la membrane d'un haut-parleur.
Fréquence et amplitude de la vibration d'un récepteur	TP3 repris en détail au TP5	
Fréquence et amplitude de la	TP3	

Concepts	TP	Commentaires
tension fournie par un micro		
Hauteur Niveau sonore – volume	TP3	Ces grandeurs sont présentées comme caractérisant les sons perçus et sont explicitement liées aux éléments du modèle fréquence et amplitude de la vibration. Les évolutions en fonction de la distance à l'émetteur sont également discutées (expériences) et permettent d'en conclure les évolutions de la fréquence et de l'amplitude de la vibration dans le milieu.
Propagation (de proche en proche et sans déplacement de matière)	TP2 repris au TP6	
Vitesse du son	TP4	Mesures de la vitesse dans différents milieux (air et eau).
Modification particulière du milieu de propagation dans le temps dans l'espace	TP6	
Longueur d'onde	TP6	

VI.3.4 Un effort pour améliorer la diffusion, la portabilité et l'appropriation des documents par les enseignants

Pour en favoriser la diffusion, l'ensemble des documents a été mis sur le serveur académique dès la deuxième année d'existence du groupe, les mises à jour étant faites au fur et à mesure de l'avancement des travaux du groupe. L'utilisation "libre" des documents était donc ainsi largement favorisée et rien n'empêchait un utilisateur de choisir une partie seulement de l'enseignement proposé (adopter une progression élaborée par un tiers dans sa totalité n'est pas une pratique simple et très habituelle). L'enseignement proposé risquait donc de recouvrir une flexibilité de fait, résultat des utilisations qui en étaient faites. Il nous semblait donc normal de prévenir ce type de pratique en laissant des espaces de liberté et d'initiative à l'enseignant, en particulier pour les séances en classe entière.

Cependant, l'ensemble des documents élaborés l'a été après de nombreuses corrections, issues le plus souvent de l'expérience des enseignants ayant testé la séquence dans leur classe, des retours obtenus en stage de formation et de l'observation attentive des élèves par les chercheurs. De manière générale, pour les séances de TP mais aussi pour les autres documents élaborés, les activités proposées et l'organisation des connaissances ont été pensées avec des hypothèses épistémologiques et

didactiques plus ou moins explicites et dans le cadre d'une progression globale qui doit pouvoir conserver sa cohérence. En conséquence, il nous paraissait dangereux de "picorer" dans les TP en choisissant telle ou telle partie, ce qui aurait mis en péril la cohérence du tout.

Les stages de formation proposés permettaient, en plus de la diffusion, de discuter et de justifier certains choix et de convaincre au sujet de la cohérence d'ensemble. Malgré ceci, il restait difficile de transmettre aux enseignants adoptant la progression l'esprit des séquences, les hypothèses sous-jacentes et les arguments sur lesquels nous avons bâti cet enseignement. La tâche était encore plus difficile pour les enseignants qui n'assistaient pas aux stages mais qui téléchargeaient d'où que ce soit les documents *via* Internet. Il devenait alors indispensable de proposer une sorte de "mode d'emploi" des documents à l'usage du professeur choisissant de mettre en pratique la progression élaborée par SOC. Pour chaque TP, les documents se sont alors multipliés et sont finalement au nombre de 5 :

.
Objectifs du TP : ils sont propres à chaque grande partie du TP, incluant un préambule et le matériel nécessaire. C'est en quelque sorte une présentation rapide du TP mais aussi des activités éventuellement proposées pour la séance en classe entière qui le suit.

.
Environnement conceptuel : ce document présente l'esprit dans lequel le TP a été élaboré, il inclut des objectifs généraux liés principalement aux activités de modélisation, et éventuellement quelques éléments de didactique. Il constitue finalement une justification théorique des choix et des activités proposées. A la fin du document, un paragraphe décrit parfois les difficultés et erreurs classiques des élèves, tant sur le fond que sur la forme d'activité (méthode).

.
Document élève : ce document est le texte de TP qui peut être donné tel quel à l'élève.

.
Document professeur : par rapport au précédent, ce document est incrusté de remarques courtes et localisées, pas forcément homogènes, pouvant porter sur un point expérimental ou sur la justification (et/ou l'importance) de l'activité en cours.

.
Cahier de l'élève : puisque l'essentiel du "cours" est fait lors des séances en demi-groupe, certains professeurs se sont inquiétés de la trace écrite des élèves pour qu'ils puissent travailler et apprendre ce cours. Ce document tente de remédier à cette inquiétude légitime. Il est distribué à la fin du TP ou au début de la séance en classe entière suivante, lorsque le professeur revient sur le TP. C'est un petit texte reprenant les éléments d'ordre "théorique" (concepts, modèles) construits, ébauchés ou imposés pendant la séance en demi-groupe. Il doit être articulé avec le texte de TP et les annotations que l'élève y a portées, trace de ses activités expérimentales, des résultats écrits issus des réflexions menées à deux et des éléments apportés par le professeur. Il

ne faut en effet pas oublier que le premier élément important du "cahier de l'élève" est constitué par le texte du TP rempli par l'élève lui-même, éventuellement accompagné des corrections qu'il a pu faire ensuite, sorte de cahier de laboratoire de tout physicien. Ceci doit constituer un support de connaissances important.

VI.4 Un enseignement expérimental favorisant l'activité de modélisation : deux exemples importants

Nous détaillons dans ce paragraphe deux modèles qui nous paraissent essentiels, proposés par le groupe SOC, ainsi que les activités organisées pour les élèves et impliquant leur utilisation.

Ceci instancie d'une part les aspects théoriques du chapitre précédent d'autre part les méthodes et contraintes propres au groupe de recherche-développement. Ces modèles et les activités liées ont souvent été modifiés au cours d'un long travail collectif. Ils sont le résultat d'une part des points de vue théoriques sur le rôle de l'activité de modélisation, pilier du projet, et par suite sur le rôle de l'expérience, d'autre part des contraintes scolaires de toutes sortes. Nous détaillons ici les modèles et les activités proposés réellement aux élèves. Les observations d'élèves en situation, qui ne seront pas exposées et analysées formellement dans ce travail (Barde, 1998), permettent d'émettre quelques critiques et de suggérer quelques améliorations (cf. en particulier le dernier chapitre), ainsi que quelques idées pour des recherches dans ce domaine.

Les deux modèles présentés sont deux des modèles évoqués dans la figure V.2-1 du chapitre V. Il s'agit des modèles "de la vibration pour la création sonore" et "particulaire pour la propagation du son".

VI.4.1 Modèle de la vibration pour la création sonore

VI.4.1.1 La vibration dans le savoir à enseigner

Un des objectifs principaux de l'enseignement de seconde au sujet du son est de lier tout son perçu à une vibration d'une surface matérielle en sachant **"qu'un émetteur sonore est une surface vibrante qui met en mouvement le milieu matériel au voisinage"** (B.O. HS du 24-09-92). L'élève doit ainsi être capable de différencier les caractères perceptifs hauteur et intensité sonore, ainsi que les grandeurs vibratoires liées, respectivement fréquence et amplitude. Notons que ceci n'est explicite que pour la hauteur puisque qu'il est indiqué dans le programme que l'élève doit savoir **"associer la notion de hauteur d'un son à la fréquence de celui-ci"**, sans que soit d'ailleurs explicitement définie la fréquence d'un son (il est juste précisé que l'élève doit savoir mesurer la fréquence d'un son, à l'aide d'un microphone et d'un oscilloscope et que **"la fréquence est une caractéristique de la source"**). Par contre il n'y a aucune mention explicite du lien qualitatif entre perception du caractère fort / faible et amplitude de la vibration source, alors que les unités watt/m^2 et *décibel* sont introduites.

VI.4.1.2 Quelques constats sur les connaissances des élèves

Des analyses préliminaires, essentiellement issues des réponses des élèves au questionnaire passé au début de la progression élaborée par le groupe SOC ont permis de dégager les tendances suivantes au sujet des connaissances des élèves avant enseignement :

L'idée de vibration n'est pas toujours utilisée (parfois à peine connue) pour décrire la production d'un son, et de façon générale n'est associée qu'à certains phénomènes sonores (par exemple quand le son est fort, quand la source est un instrument de musique à corde, etc.). Ainsi, pour la majorité des élèves de seconde, le son n'est pas **systématiquement** associé à une vibration ce que nous considérons pourtant indispensable à la compréhension de la physique du son en terme d'onde ;

Lorsque le terme vibration est utilisé, il l'est dans des contextes assez différents et en référence à des "objets" variés (l'air, la corde...). Cette multiplicité d'usages reflète une fonction générique permettant ainsi à l'élève de décrire ou interpréter un certain nombre de phénomènes pour lesquels il semble manquer de mots et de concepts. Le mot *vibration* semble jouer le rôle de "cache-misère" ; cependant la notion de vibration est généralement associée à l'idée de va-et-vient ou d'aller-retour, trait significatif qui semble être commun à la quasi-totalité des élèves de début de seconde (pour un début de justification de ce point de vue voir l'analyse linguistique de la partie C) ;

Il est donc possible d'appuyer les séquences d'enseignement sur la connaissance relativement partagée de cette idée vague de va-et-vient rattachées par les élèves à la notion de vibration. Celle-ci constitue ainsi un "germe" potentiel pour l'acquisition de notions fondamentales en physique (Baker et Tiberghien, 1999).

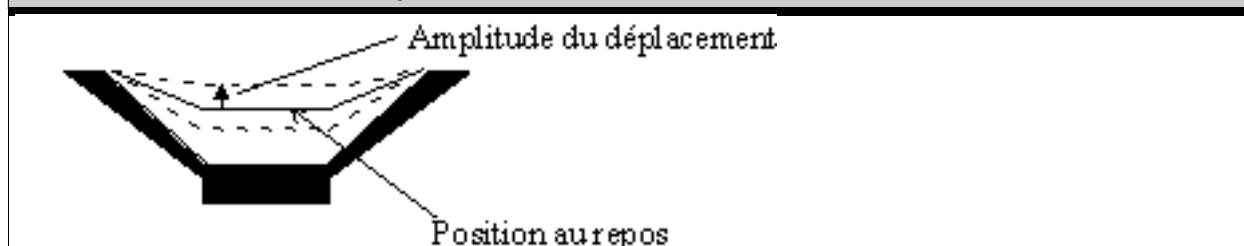
VI.4.1.3 Le modèle proposé

Dans un premier temps, il a paru essentiel de faire émerger la nécessité d'une vibration matérielle pour percevoir un son. Un des objectifs majeurs de la présente utilisation du modèle est d'amener l'élève à faire le lien entre le phénomène qu'il perçoit, et qu'il désigne comme étant un son, et le phénomène physique (visible ou tactile dans certaines conditions particulières) qui lui est lié. C'est ce processus qui permet d'introduire la vibration comme phénomène commun aux différents sons perçus. Il convenait alors aussi, pour passer de la notion commune de vibration au concept physique de donner les moyens de caractériser le phénomène de vibration à l'aide de grandeurs physiques.

La mise en texte du modèle, dont il y a une trace dans "le cahier de l'élève" du TP n°1 et qui pourra lui servir dans la suite de l'enseignement apparaît donc sous la forme suivante :

Figure VI.4-1 : modèle de la vibration pour la création sonore

Quand il y a un son, alors nécessairement l'objet (ou la partie d'objet) qui produit le son vibre. On appelle source sonore l'objet qui produit le son. La vibration émise par la source sonore ne se propage que s'il y a de la matière. La matière est alors appelée milieu de propagation. Dans le vide cette vibration ne peut pas se propager. Chaque source sonore possède une de ses parties qui vibre. Une vibration est un mouvement de va-et-vient d'un objet (ou mouvement d'aller-retour). La vibration de la source est caractérisée par une fréquence et une amplitude. Fréquence et amplitude sont des grandeurs physiques. Définitions : - La *fréquence de vibration* est le nombre d'aller-retour (1 aller et 1 retour comptent pour un) effectués en une seconde. Elle s'exprime en *Hertz* (Hz). - Le même nombre d'aller-retour en une seconde peut se faire avec un déplacement plus ou moins grand de la partie de la source qui vibre : c'est ce qui est caractérisé par l'*amplitude de vibration* (cf. schéma dans le cas du haut-parleur).



Le modèle est coélaboré par l'enseignant et les élèves au cours du TP n°1, au fur et à mesure des activités expérimentales qu'ils réalisent. Nous faisons en effet le choix de susciter le besoin de modèle pour tendre d'une part vers une généralisation phénoménologique de toutes les situations de créations sonores d'autre part vers la possibilité de caractériser par le modèle des caractères perceptifs.

En ce qui concerne justement les liens avec la perception, il nous a paru important dans un second temps, pour donner une correspondance expérimentale aux deux paramètres fondamentaux de la vibration, *fréquence* et *amplitude*, de réduire la dépendance de la perception fort / faible à celle de l'amplitude de vibration, ce qui constitue une bonne approximation. Dans une logique de modélisation, il est intéressant de faire une première distinction entre la vibration-cause et la sensation-effet (cf. chapitre I), en présentant la **hauteur** d'un son (définie, pour utiliser un vocabulaire supposé connu de l'élève, par son caractère plus ou moins aigu ou grave) comme dépendant essentiellement de la **fréquence** de la vibration, et l'**intensité** d'un son (définie par son caractère plus ou moins fort ou faible) comme dépendant essentiellement de l'**amplitude** de la vibration. La pertinence et l'utilité de ces grandeurs sont renforcées dans le cadre de l'enseignement car elles permettront de décrire (même imparfaitement) tous les sons étudiés. Mais le concept de vibration ainsi que les grandeurs physiques *fréquence* et *amplitude* qui servent à le caractériser sont à définir précisément car ces mêmes mots ont un sens beaucoup moins précis dans le langage courant, or la plupart des novices ne les ont rencontrés que dans la vie quotidienne. De plus, comme nous l'avons mentionné dans le tableau VI.3-1, ces deux concepts sont dans la suite de la progression (mais également avant la partie sur le son, en électricité) attribués à des entités différentes (vibration mécanique, tension électrique périodique, vibration des particules d'air). Il conviendra

ainsi de rendre explicite à chaque fois ce à quoi sont attachés ces deux concepts. Nous retrouvons ici les correspondances modélisantes dont nous avons déjà parlé au chapitre 1 :

Son perçu	Vibration cause (ou onde sonore)
Hauteur (aigu / grave) $\leftrightarrow$	Fréquence
Intensité (fort / faible) $\leftrightarrow$	Amplitude

Nous laissons ici de côté, dans un premier temps, la façon dont la surface matérielle vibre (forme du signal). Le texte du modèle, qui n'est qu'une suite de celui que nous venons de présenter apparaît alors sous cette forme dans le cahier de l'élève du TP n°3 :

Le Lien entre les sensations auditives et les caractéristiques physiques de la vibration sonore
 En fait, que regardant un objet, le son est caractérisé, à, principalement, par :
 sa hauteur, c'est à dire la caractéristique du son, nous pourrions dire
 son volume c'est à dire la caractéristique plus ou moins fort ou faible

- La hauteur d'un son est essentiellement liée à la *fréquence* de vibration.
- Le volume (ou niveau sonore) d'un son est essentiellement lié à l'*amplitude* de vibration.

Figure VI.4-2 : suite du modèle de la vibration pour la création sonore

VI.4.1.4 Mode de présentation et d'utilisation du modèle

Les premières activités du TP n°1 consistent à émettre différents sons par différents moyens (diapason, papier à cigarettes, haut-parleur et GBF, tambourin, instrument à corde). L'objectif de la séquence est affiché ("trouver une condition nécessaire à l'émission d'un son") et pour chaque situation les élèves doivent identifier la source et décrire son comportement (ils peuvent toucher, voir, entendre). Après toutes les expériences, une unique question est posée : *y a-t-il un comportement commun à toutes ces sources ?* Il s'agit donc, à partir des champs expérimentaux de la mécanique vibratoire et de la perception auditive, de passer à une explication unifiante dans le monde des modèles. Nous utilisons bien évidemment ici la connaissance possible du terme *vibration* qui peut spontanément émerger mais que la physique doit systématiser en référence au son et être capable de décrire de façon objective et précise en terme de grandeurs physiques. Nous reprenons ainsi à notre compte un mode de présentation du modèle qui ressemble à une démarche inductiviste puisque à partir d'un ensemble de situations les élèves sont amenés à construire le modèle. Cette phase est complétée par une démarche déductive puisque les élèves sont ensuite invités à utiliser le modèle. La description de la vibration en terme de grandeurs physiques est imposée, puis utilisée pour être mise en relation avec les perceptions auditives des élèves (l'enseignant indique juste qu'il fait varier la fréquence, ou l'amplitude, et demande de décrire l'évolution sonore). Ceci est fait dès le TP n°1 mais constituera l'activité centrale du TP n°3. Cette apparente redondance n'en est pas une de notre point de vue. Les observations que nous avons pu faire montrent en effet que l'établissement de ces relations demande du temps (Barde, 1998).

Ainsi une partie du modèle et la rédaction finale (celle du cahier de l'élève) sont au bout du compte imposées par l'enseignant une fois que le besoin de modèle s'est fait sentir et que les élèves ont commencé à mettre en relation des éléments du champ expérimental et des éléments du modèle. Nous nous situons donc dans une position intermédiaire entre imposition et induction du modèle, ce qui nous paraît être, dans la continuité des travaux réalisés dans ce cadre (Méheut et al., 1994, Tiberghien, 1996), le meilleur moyen de prendre en compte les activités de modélisation des élèves *pendant* la situation.

Précisons enfin que, dans le TP n°1, pour que le concept de fréquence prenne sens, une mesure est réalisée par les élèves dès que la fréquence a été définie (comptage du nombre d'aller-retour de la membrane d'un haut-parleur à fréquence suffisamment basse pour rendre le comptage possible). Quant à l'amplitude, les élèves peuvent constater les effets qualitatifs d'une variation sur le mouvement de cette membrane.

Finalement, durant toutes ces activités expérimentales, les activités de modélisations visées sont nombreuses, progressives et peuvent être résumées sur la figure VI.4-3 :

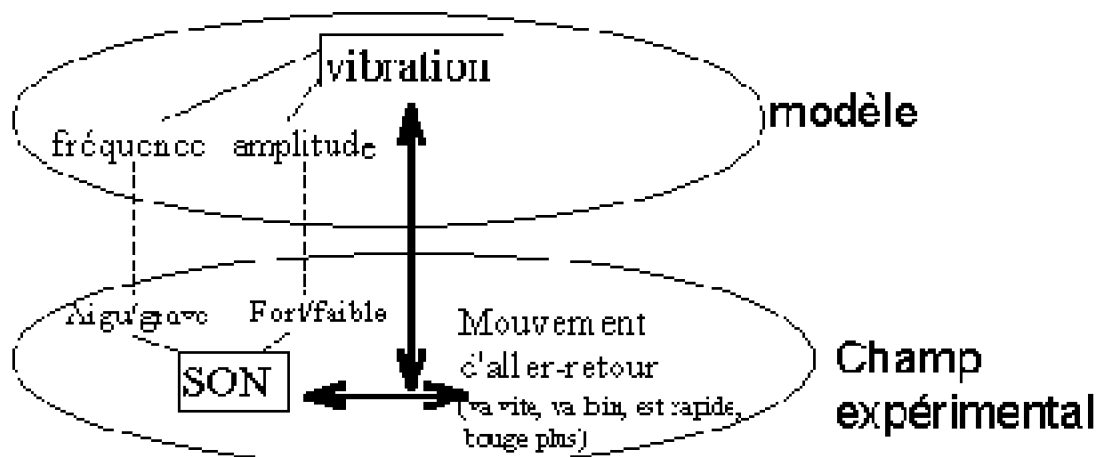


Figure VI.4-3 : activités de modélisation issues de l'utilisation du modèle de la vibration

Ces liens à établir (dès le TP n°1) ne le sont pas facilement. En ce sens, il sera fait à nouveau appel à ce modèle lors du TP n°3. Le modèle y prendra un peu plus d'épaisseur dans la mesure où les prédictions et les comparaisons se feront alors en regardant le signal électrique fourni au haut-parleur, puis le signal électrique fourni par un microphone (le domaine expérimental électrique du § V.2 est alors pris en compte dans les activités, et il faut alors avoir vu, dans le TP n°2, une première approche microscopique de la propagation pour comprendre ce qu'il se passe au niveau du microphone). On voit bien ici les possibilités d'évolution du modèle, les extensions possibles de son domaine de pertinence.

VI.4.1.5 Domaine de fonctionnement et limites du modèle

Les activités principales de l'élève liées à l'ensemble du modèle (figure VI.4-1 et figure VI.4-2 réunies), que ce soit pour en éprouver le besoin, l'élaborer ou l'utiliser, ont été rapidement décrites. Comme tout modèle, il constitue cependant une description partielle

et forcément arbitraire de la réalité. Ainsi, s'il est relativement bien adapté à la présentation des savoirs au programme concernant l'émission sonore et les caractérisations qualitatives de hauteur et d'intensité d'un son, qui constituent finalement son domaine de fonctionnement, il présente inévitablement des limites.

Les contenus du programme ne fournissent pas de cadre explicatif pour interpréter les créations sonores dont l'origine n'est pas une vibration de surfaces matérielles. Le modèle présenté ne le permet pas davantage. Il s'agit là par exemple de toutes les situations où le milieu est mis en vibration par des phénomènes complexes de turbulence qui font l'objet d'études par des mécaniciens des fluides (ces sons vont du son musical de la flûte à bec, au sifflement d'un train qui passe).

Le modèle ne permet pas non plus d'interpréter la variété des sonorités pour une fréquence et une amplitude donnée.

Il est également inopérant pour décrire ce qui se passe dans le milieu de propagation. S'il est indispensable pour se faire une idée de la nature de l'information événementielle à communiquer à un récepteur, pour comprendre ce qui est contenu dans un son qui se propage, il ne permet pas de décrire la façon dont s'opère cette propagation. Ce sera l'objet du modèle que nous présentons par la suite. En conséquence, le modèle de la vibration ne permet pas non plus, puisqu'il s'intéresse à l'émetteur, d'interpréter les variations de perceptions liées à l'espace (diminution du son quand on s'éloigne de la source par exemple).

Mais dans ce cas comme dans d'autres (par exemple pour le fonctionnement du microphone, vu après dans la progression), le modèle de la vibration pour l'émission sonore semble être un passage obligé pour préciser la notion de vibration et les caractéristiques perceptives associées. Il conviendra alors d'étendre des traits pertinents de ce modèle à d'autres objets, tels que le milieu (qui d'une certaine façon vibre aussi), le microphone ou le tympan. Le modèle de la vibration possède donc une heuristique importante qu'il convient de ne pas laisser inexploitée.

Signalons enfin qu'une telle possibilité d'utilisation du phénomène ne résout pas la difficulté de visualisation des phénomènes vibratoires dont les fréquences sont dans le domaine auditif. Il n'est pas question ici de croire qu'on va pouvoir observer directement des mouvements vibratoires de plusieurs dizaines de Hertz (ce serait mettre en cause les limites de la vision humaine) et on pourra seulement, dans certains cas, les sentir par le contact. De plus, le modèle exprimé en texte ou par des représentations iconiques ne permet pas de rendre compte de la dynamique à partir de laquelle les notions de *vibration* et de *fréquence* prennent sens. La fonction qu'on attribue généralement au modèle de représentation "concrète" et perceptible de concepts abstraits (Bachelard, 1979) reste donc à imaginer, en particulier dans le cas de ces deux concepts. La simulation apparaîtra alors comme un moyen pratique de la faciliter. Le groupe SOC n'a pas proposé une telle simulation qui sera par contre exposée dans le dernier chapitre.

VI.4.2 Modèle particulière de la propagation du son

VI.4.2.1 Place de la propagation dans le savoir à enseigner et rappel sur les

conceptions

Nous avons vu au chapitre II que la propagation du son occupe une place importante dans le programme de seconde. Il est cependant remarquable de constater que ce qui est mis en avant est essentiellement la nécessité d'un milieu, l'existence de la vitesse de propagation (qui doit être connue dans l'air et doit pouvoir être mesurée). Ces deux blocs de savoirs sont l'occasion de mettre en oeuvre des expériences prototypiques et présentes depuis longtemps dans l'enseignement, et que le groupe SOC ne se dispense d'ailleurs pas de proposer (en particulier dans les TP n°1 et n°4). On peut penser en particulier à l'expérience de la sonnette sous vide et les expériences de mesure de temps de vol pour la vitesse. Ces deux aspects ne vont pas réellement contre des modèles spontanés forts, comme les novices peuvent en avoir en référence à d'autres classes de situations (mécaniques en particulier). Le fait que le son se déplace et qu'il ait besoin d'un milieu pour ceci n'est pas fondamentalement choquant pour le novice, ou tout au moins de va pas à l'encontre des mécanismes explicatifs spontanés forts qui seraient éventuellement mis en oeuvre.

Par contre, pour comprendre *comment* et *pourquoi* le son se propage, l'approche phénoménologique ne suffit plus. Un **mécanisme** explicatif est nécessaire et celui que fournit la physique est la plupart du temps bien éloigné, voire opposé, aux explications fournies par les élèves (quand elles peuvent être fournies) relevées au chapitre III. Par exemple, la physique fournit un mécanisme explicatif qui, macroscopiquement, laisse le milieu immobile. Ou encore, la physique rend le milieu actif dans le mécanisme de propagation alors qu'il est souvent uniquement un support passif pour les élèves.

Le programme tente de décrire plus précisément ce mécanisme de propagation. Il est ainsi mentionné dans un premier temps que le déplacement se fait **"de proche en proche et sans déplacement de matière"** (B.O.). Pour pallier les difficultés d'observation des phénomènes prenant place dans le milieu, des exemples macroscopiques sont cités, en guise d'illustration de ces deux traits saillants de tout mécanisme de propagation ondulatoire. La présentation de ces **"analogies ondulatoires"** est réaffirmée dans les aménagements de programme mais comme c'est quasiment toujours le cas, ces analogies ne font qu'amener potentiellement de nouveaux problèmes : quel coût cognitif pour passer de l'exemple fourni à la propagation du son, et à quel prix ? Nous ne rentrerons pas davantage dans les difficultés qu'induisent ces illustrations, mais elles risquent fort, en tous les cas, d'être insuffisantes pour déstabiliser les conceptions relativement stables que peuvent avoir les élèves sur la propagation du son et que nous avons décrites au chapitre III.

Nous estimons qu'à ce stade, la physique ne fournit toujours pas d'explication de la façon dont une information acoustique peut être transmise en un autre endroit du milieu. Pour ceci, dans le cadre d'un enseignement qui, à ce niveau, est privé du formalisme mathématique ondulatoire, il nous paraît alors essentiel de proposer, comme le fait le programme, une **"interprétation microscopique de la propagation dans le cas du son"** (B.O.). Il est donc regrettable que celle-ci ait été supprimée lors des aménagements, ainsi que toute référence à ce sujet dans le programme. Nous redisons ici clairement que l'affirmation axiomatique qui l'a remplacée (**"le son est une oscillation de pression qui**

se propage ") n'est compréhensible que par celui qui sait déjà ce dont il s'agit (les concepts d'oscillation et de pression sont des concepts complexes de la physique et une telle affirmation ne donne toujours pas de processus explicatif compréhensible par les élèves).

Dans le programme, la propagation du son est suivie par la définition de la longueur d'onde (*a priori* par la relation entre période et vitesse) et par les activités expérimentales auxquelles elle donne lieu. Il est ainsi attendu que l'élève sache **"mesurer la longueur d'onde à l'aide d'un ou mieux de deux microphones"** (cette compétence n'a pas été supprimée dans les aménagements). L'expérience à laquelle il est fait allusion est de fait largement répandue en seconde au point de devenir prototypique. Un schéma en est fourni figure VI.4-4.

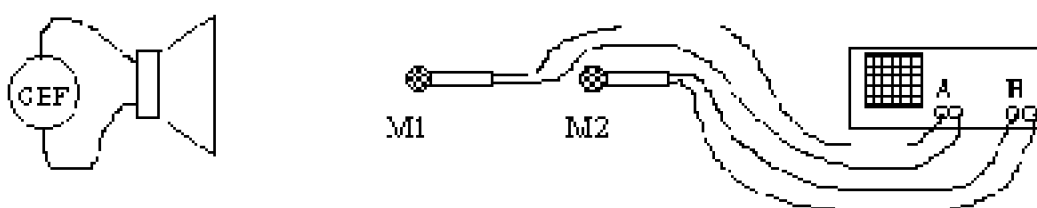


Figure VI.4.4 : expérience classique pour mesurer la longueur d'onde

Cette expérience, consiste à observer à l'oscilloscope l'évolution temporelle des tensions délivrées par deux micros détectant le même son à des distances différentes. L'écart entre deux positions du micro M2 par exemple qui permet de déphaser la tension qu'il délivre de 2π par rapport à la tension du micro M1 donne alors la longueur d'onde. Pour notre part, il nous paraît essentiel de comprendre comment le son se propage pour donner du sens au concept complexe de longueur d'onde. Par suite, il est quasiment impossible, sans compréhension de ce qui se passe effectivement dans le milieu et de ce que "capte" les microphones, de percevoir pourquoi un tel protocole permet de mesurer la longueur d'onde.

Si elle présente bien évidemment un intérêt didactique indéniable, en particulier pour définir la longueur d'onde autrement que par une simple formule vidée de sens et exploiter cette définition pour en faire une mesure, cette expérience très instrumentalisée n'éclaire pas forcément les élèves sur le mécanisme de propagation du son. Elle peut pourtant sembler remarquable au physicien qui maîtrise le fonctionnement de l'oscillo, et qui est familier des distinctions entre évolution temporelle et évolution spatiale. Traditionnellement, pour observer "ce qu'il se passe", l'élève est invité à utiliser un haut-parleur, un micro, un oscillo..., instruments nécessitant des connaissances assez importantes et non triviales pour comprendre ce qu'ils mesurent effectivement. Ces instruments sont alors présentés comme le moyen d'avoir une représentation à chaque instant de ce qu'il se passe dans le milieu et auquel l'élève n'a pas accès directement avec sa vue. Ce lien non évident entre ce qui est visible à l'oscilloscope et ce qu'il se passe dans le milieu en terme de compression et de dilatation demande énormément de temps pour être construit par l'élève et reste extrêmement compliqué sans représentation externe de ce qui se passe au niveau microscopique. La complexité des appareils

expérimentaux (tant au niveau de leur fonction que de leur fonctionnement) alliée à un modèle complexe support d'évolutions spatio-temporelles rend cette partie difficile à enseigner du point de vue des enseignants (cf. chapitre II) et à comprendre du point de vue de l'élève.

La dépendance spatio-temporelle joue en effet un rôle majeur dans la complexité d'apprentissage des phénomènes en jeu. Les deux variations (temporelle et spatiale) de la grandeur acoustique (par exemple la surpression) ne sont pas indépendantes et les moyens expérimentaux utilisés traditionnellement pour "capter" ces évolutions d'une part ne donnent une idée que de l'évolution temporelle (micro + oscillo par exemple) *ou* spatiale (tube de Kundt par exemple mais dans une situation où les ondes sont stationnaires...), d'autre part ne permettent pas de lever le mélange rapidement fait entre temps et espace. Pour illustrer ce dernier point remarquons par exemple que, dans l'expérience de la figure V.4-4, lorsque l'élève déplace un micro il observe à l'oscilloscope un glissement (temporel donc) d'une des deux courbes par rapport à l'autre. Comment empêcher alors l'assimilation naturelle entre le mouvement du microphone et celui de la courbe, devenant alors une courbe dans l'espace !

VI.4.2.2 Le besoin d'un modèle particulière

Pour les raisons que nous venons de mentionner, une approche particulière impliquant des représentations graphiques de ce qui se passe dans le milieu en présence d'un son nous semble indispensable pour :

• comprendre comment l'information sonore est transmise ;

• donner du sens au concept de longueur d'onde (ou au moins envisager sa compréhension dans de meilleures conditions).

Une fois un modèle particulière élaboré en référence à ces deux objectifs principaux, le domaine de fonctionnement du modèle pourra être délimité.

De plus, dans ce domaine (la propagation des sons), quelques recherches (Arnaud, 1997 ; Robles, 1997 ; Foley, 1995) ont montré l'apport d'un modèle particulière faisant appel à la représentation iconique, animé ou non, sur la compréhension du sujet.

Il reste alors à proposer des situations dont l'interprétation peut utiliser avantageusement un tel modèle. Or, le premier des objectifs visé (comprendre la transmission d'information) peut ne pas être suffisant pour susciter le besoin de modèle chez l'élève. Comme le suggèrent justement M.-G. Séré et M. Moppert (1989) à propos d'un modèle particulière introduit en 6ème, il faut utiliser des situations rendant le niveau macroscopique insuffisamment interprétatif. Pour le sujet qui nous concerne, l'étude des conceptions ou des raisonnements d'élèves en situation (Arnaud, 1997) nous renseignent sur certains des phénomènes qui sont difficiles à interpréter par une analyse macroscopique et qui vont donc constituer de bonnes occasions expérimentales de susciter le passage à un niveau particulière : pas de déplacement de matière, vitesse plus

grande dans un liquide que dans un gaz, passage d'un milieu à un autre... Les activités expérimentales proposées à cet effet par le groupe SOC au début du TP n°2 sont les suivantes :

expérience des tambourins (figure VI.4-5) : il est demandé d'expliquer ce qui se passe dans l'air pour que la petite boule en contact avec le tambourin 2 se mette à sauter quand on frappe le tambourin 1.

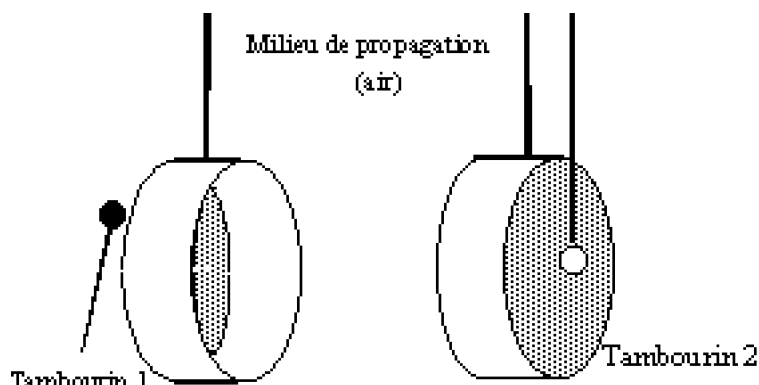


Figure VI.4-5 : expérience des tambourins

expérience de la bougie : une bougie allumée est placée devant un haut-parleur et on demande d'observer le mouvement de la bougie, et de le comparer au mouvement de la membrane du haut-parleur.

VI.4.2.3 Présentation du modèle

Après avoir proposé les deux activités expérimentales décrites ci-dessus dans le but de susciter des interrogations mais aussi de fournir des indices que ce qui se passe dans le milieu, le TP n°2 propose une première interprétation microscopique de la propagation du son à l'aide de la projection d'un film court (3 minutes). Ce film a fait l'objet d'un projet de recherche (Robles, 1997) et présente à l'aide d'un modèle matérialisé (de petits aimants sur un coussin d'air) la façon dont une impulsion mécanique peut se propager de proche en proche. Cependant, ce film est insuffisant pour permettre le transfert à des situations sonores vibratoires puisque qu'on n'y voit qu'un aller-retour. De plus, les contraintes matérielles du système ne permettent pas de conclure franchement et sans ambiguïté à un non-déplacement de matière. Cependant, il permet déjà de construire des idées intéressantes quant au modèle à élaborer. Pour rendre les élèves acteurs de la mise en texte ou en image de ce modèle, il leur est demandé de faire un schéma représentant la propagation du son dans le gaz, de décrire le mouvement d'une particule du gaz lors de la propagation du son et enfin de dire s'il y a transport de matière de l'émetteur au récepteur. Ceci permet d'une part de vérifier que cette première simulation est une bonne base pour la construction d'un modèle plus complet, d'autre part de susciter bien souvent le débat dans la classe.

Nous avons considéré cette première interprétation comme suffisante pour la suite des activités de la progression (en particulier première modélisation du fonctionnement du microphone).

Ce n'est que dans le TP n°6, considéré comme majeur par le groupe SOC, que le modèle particulière est finalisé. Cette fois, comme dans d'autres expérimentations (Tiberghien A. et Megalakaki, 1995) le modèle est imposé en début de TP et sert de support jusqu'à la fin de la séance, moment où il pourra être enrichi. Ce modèle utilise du texte et des représentations iconiques *fixes* inspirés d'un travail réalisé sur le sujet (Arnaud, 1997) mais aussi de représentations de livres scolaires de seconde (Lecardonnel et al., 1997, p. 116 ; Tomasino & Pénigaud, 1993, p.108). Les représentations particulières choisies ici sont reprises d'un logiciel d'animation élaboré par Foley (1995). Le modèle est présenté explicitement aux élèves sous le titre de "Modèle de l'onde sonore" et est rédigé de la façon suivante :

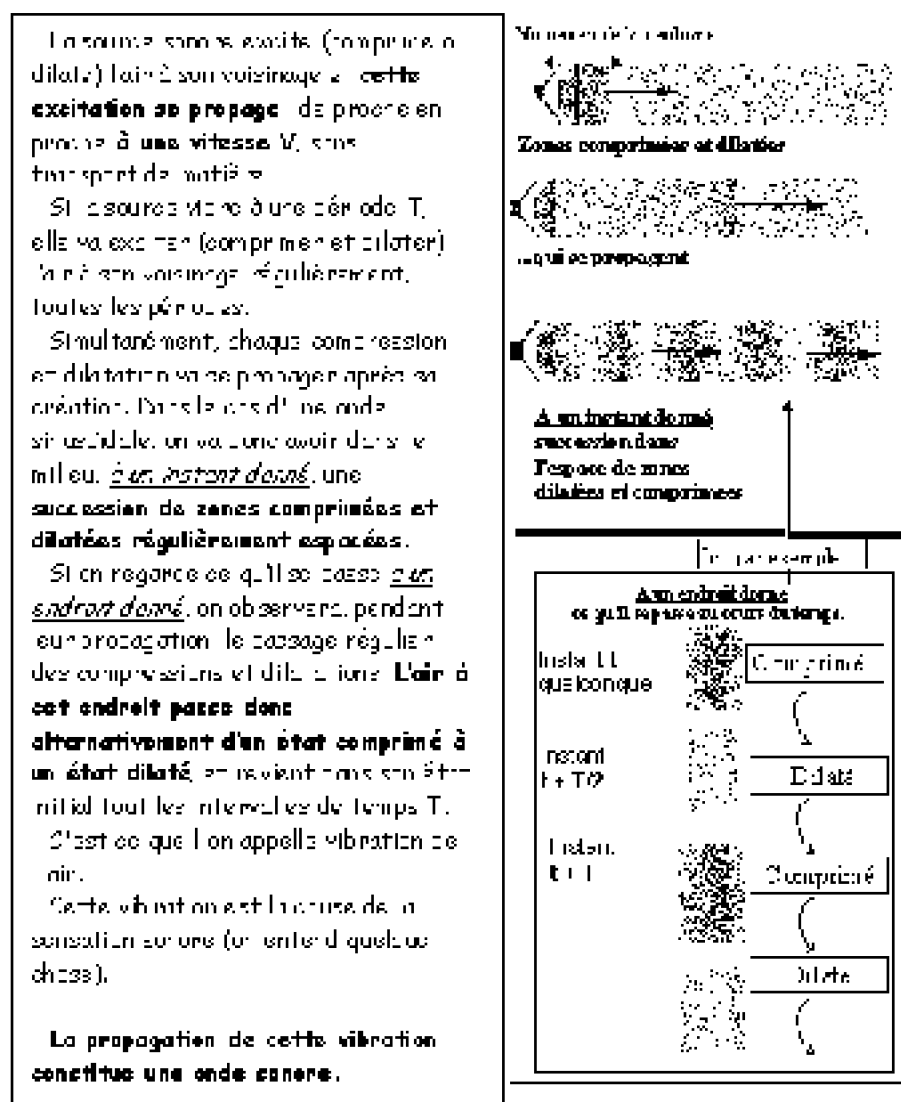


Figure VI.4-6 : modèle de l'onde sonore

Ce modèle sépare donc explicitement ce qui se passe dans le temps de ce qui se passe dans l'espace en soulignant cependant que c'est seulement en considérant les deux évolutions qu'il est possible de caractériser l'onde sonore. Pour minimiser les risques de confusion avec la représentation spatiale, la représentation temporelle n'a pas été, volontairement, présentée de gauche à droite mais de haut en bas. Ces deux évolutions, séparées pour des raisons didactiques, doivent ensuite pouvoir être mises en relation pour comprendre réellement le mécanisme de propagation. Les études de l'utilisation de ce modèle (Arnaud, 1997) concluent à la nécessité de l'animer les images fixes fournies ici pour tenter d'améliorer ce rapprochement. Cette simulation animée a été réalisée hors du cadre du groupe SOC pour ce travail de thèse et que nous la détaillerons dans le dernier chapitre.

Enfin, on peut remarquer que ce sont moins ici les règles d'interaction entre particules qui sont décrites que le résultat de leur influence mutuelle en terme de zones de compression et de dilatation, dont le repérage graphique ne semble pas poser de problèmes (Chomat, Larcher et Méheut, 1992). En ce sens, ce modèle reste assez phénoménologique et n'a de microscopique que la représentation qu'il adopte. Il nous paraît important d'utiliser le terme de particule (importé de ce qui est le correspondant le plus proche du savoir savant sur le sujet, la *particule fluide*) plutôt que le terme de molécules. A ce titre il serait plus correct du point de vue de la physique de parler d'échelle mésoscopique mais nous pouvons considérer au niveau d'enseignement où nous nous situons, et comme dans d'autres recherches, que tout ce qui n'est pas macroscopique (au sens d'observable à l'oeil nu) est microscopique. Nous préférons parler de modèle *particulaire*.

VI.4.2.4 Utilisation du modèle

L'ensemble du TP n°6 utilise le modèle présenté. Ainsi, il est demandé à l'élève d'utiliser le modèle pour :

- interpréter la relation entre le signal électrique fourni par un microphone et l'état de l'air au niveau de ce microphone ;

- effectuer des prévisions concernant l'expérience de la figure V-4.5 : comparaison des périodes et des amplitudes des deux courbes observées, dépendance de ce qui est observé à l'écran avec la position du micro M2, puis il est demandé d'expliquer pourquoi à un instant où la tension délivrée par M1 est maximale, celle de M2 ne l'est pas forcément, et enfin de prévoir le décalage temporel des deux courbes en fonction de l'écartement des microphones ;

- effectuer une analyse critique des prévisions après avoir réaliser les expériences ;

- utiliser les représentations du modèle pour placer, sur un schéma de compressions et dilatations, les microphones qui donneraient tel ou tel oscillogramme (introduction à

cette occasion de la terminologie *en phase*, *en opposition de phase*).

Nous insistons ici sur le choix du vocabulaire qui permet de distinguer le décalage *temporel* des courbes visualisées et l'écartement *spatial* des microphones.

Enfin, la dernière phase du TP, certainement la plus difficile en ce qui concerne l'articulation entre événements et concepts consiste à corrélérer :

d'une part ce qui existe dans l'espace à deux endroits différents

d'autre part ce qui s'est passé dans le temps pour arriver à ces deux états dans l'espace.

L'élève doit donc pour ceci prolonger le modèle en adoptant une représentation dynamique de ce qui lui est présenté de façon statique.

A la suite de la représentation ci-dessous, les questions posées sont :



1. L'état de l'air existant en B a-t-il été créé, par la membrane du haut-parleur, avant ou après l'état de l'air existant en A ?

2. Combien de temps avant ou combien de temps après ? On désigne cette durée par Δt .

3. Expérience : mesurer la distance AB.

4. Calculer le quotient $AB / \Delta t$. Quelle est l'unité de ce résultat ? Quelle est sa signification ?

5. Trouver un nom pour la distance AB.

Nous tentons donc ici d'illustrer la pertinence et le sens fondamental de cette grandeur que la physique appelle longueur d'onde. Elle est bien une longueur et la signification que la situation vise à en construire permet dans un second temps de retrouver la formule qui, dans le programme, est posée comme définition de la longueur d'onde (distance parcourue par une compression pendant une période).

Dans la séance suivante, l'enseignant institutionnalise le concept de longueur d'onde en incluant au modèle la partie suivante, distribuée aux élèves après le TP :

La longueur d'onde est la plus petite distance séparant deux endroits de l'espace où l'air est dans le même état à chaque instant.

Pendant une période, une zone de compression s'est déplacée d'une longueur d'onde (ce même pour une zone de décompression).

Les grandeurs physiques impliquées dans la propagation sont :

- la vitesse de propagation (V);
- la période T (elle se mesure en μ il ou en ms);
- la longueur d'onde λ : c'est une distance qu'on peut mesurer grâce à deux micros et un oscilloscope.

Figure VI.4-7 : suite du modèle de l'onde sonore

Le fait que la formule $\lambda = V.T$ n'apparaissent pas comme telle dans ce modèle est volontaire. Nous pensons en effet que si c'était le cas, les élèves auraient tendance à ne retenir que cela en perdant la signification de chacun des concepts impliqués. Rien n'empêchera l'utilisation courante d'une telle formule lorsque le détour par la signification des concepts aura été suffisamment pratiqué.

VI.4.2.5 Domaine de fonctionnement et limites du modèle

Nous avons vu avec ce qui précède que le modèle proposé fonctionne bien sur le contenu d'enseignement au programme, et même un peu au-delà puisqu'il permet de donner une représentation microscopique explicite de la propagation des sons, et par suite une signification "imagée" à la longueur d'onde. Le modèle permet également de faire émerger implicitement un des champs acoustiques, le champ de surpression puisque les répartitions contrastées de particules sont assez intuitivement associées à des variations de l'idée quotidienne de pression (le lexique de désignation *compression* et *dilatation* y contribue). Le champ de vitesse vibratoire ne pourra par contre être suggéré que par une animation des représentations du modèle. Enfin, signalons également la possibilité d'interpréter de façon générale l'information sur le milieu qu'indique un microphone *via* une tension électrique.

Il est bien entendu que ce modèle réalise, comme bien souvent, un compromis entre une référence au savoir savant qui assure son appartenance à la physique et une efficacité didactique visée, en référence à un contenu d'enseignement donné. Ce modèle est donc évidemment critiquable du point de vue des restrictions qu'il impose :

- il ne précise pas les échelles en jeu, non vraiment indispensable pour les séquences d'enseignement que nous avons proposées ;
- il adopte une représentation à deux dimensions ;
- il représente une onde dans un tuyau sonore, ce qui est un cas très particulier, et non amortie ;

il est donc impropre en l'état à interpréter la diminution d'intensité du son avec la distance ;

il ne permet pas d'interpréter simplement les situations de réflexion, diffraction ou changement de milieu (quoi que sur ce point le modèle peut donner des outils au sens où il permet d'imaginer les conséquences sur la propagation d'un changement des propriétés microscopiques) ;

enfin, il restreint les représentations proposées à des excitations sinusoïdales qui induisent une apparente régularité dans l'alternance des zones comprimées et dilatées.

La force des modèles particuliers peut résider dans leur caractère unificateur (Méheut, 1996). Les phénomènes sonores procurent donc un moyen d'étendre éventuellement le domaine de fonctionnement et de pertinence de tels modèles. Un difficile problème de compatibilité des modèles se pose alors. Sous quelles conditions un modèle efficace pour expliquer une détente, un changement de phase ou un chauffage le reste-t-il pour interpréter les paramètres influençant la propagation d'un son ? Ceci semble ici assez difficile, du fait du modèle choisi. Cette difficulté à avoir d'autres référents expérimentaux que le référent "son" pose le problème de l'identité du modèle que nous proposons. La portée du modèle concerne bien plus les phénomènes ondulatoires que les phénomènes thermodynamiques par exemple. Ainsi, il nous semble davantage modèle ondulatoire que modèle particulière au sens où ce qui est fixé comme règle concerne essentiellement la façon dont l'information se propage en mettant entre parenthèse le type d'interaction entre les constituants du milieu considéré. Une représentation animée, permettant la simulation, pourra alors contribuer à résoudre cette limite actuelle du modèle. Ce sera l'objectif du travail exposé dans la partie D.

Partie C : Systèmes explicatifs, langage et enseignement

La partie A de notre travail a permis de dégager les points de vue théoriques que nous adoptons. Il a fallu pour ceci expliciter les spécificités du sujet d'enseignement, et tout particulièrement analyser les éléments à prendre en compte pour comprendre comment peut s'élaborer une phénoménologie bien éloignée de celle que le physicien adopte (chapitre I). Il a fallu également analyser le savoir à enseigner actuel et de façon plus générale celui traditionnellement présent au niveau secondaire (chapitre II).

Enfin, puisque notre travail expérimental concerne la phénoménologie naïve au sujet du son, son influence sur les processus d'apprentissage et son éventuelle évolution, nous devons étudier les travaux sur l'organisation des connaissances spontanées, de façon théorique d'une part, sur le sujet qui nous concerne d'autre part. La revue bibliographique concernant les éléments de ce que nous avons appelé de façon générale des *systèmes explicatifs* a permis de dégager des éléments de réflexion pour de nouvelles recherches dans cette voie (Chapitre III).

Dans la continuité de ces réflexions théoriques et de cette revue de travaux, nous présentons dans la présente partie les outils élaborés pour dégager, à partir des résultats expérimentaux que nous aurons recueillis, des éléments des systèmes explicatifs des élèves au sujet des phénomènes sonores quotidiens. Pour cela, dans la continuité de notre réflexion théorique, le savoir de référence ne sera pas systématiquement la physique scolaire, puisque des points de vue phénoménologiques seront également

adoptés. Cette analyse permettra de répondre à quelques-unes des questions du chapitre IV.

Nous analyserons de plus l'évolution des systèmes explicatifs et des outils de description et d'interprétation des élèves selon qu'ils ont suivi un enseignement "classique" ou l'enseignement "SOC" dont nous avons détaillé à la fois les hypothèses préalables, les méthodes et les contenus dans la partie B.

La méthodologie sera exposée dans le chapitre VII, ainsi que les questions précises auxquelles nous nous proposons de répondre.

Les résultats concernant les systèmes explicatifs seront largement exposés au chapitre VIII.

Les analyses précédentes ont permis de faire émerger, à plusieurs reprises, l'importance de la langue, tout particulièrement pour un sujet où l'articulation entre les termes qui servent à percevoir et ceux qui servent à conceptualiser est cruciale. Ce sera l'objet du chapitre IX. Ceci permettra de fournir quelques outils méthodologiques sur ce type d'étude en didactique des sciences et quelques résultats qui nous paraissent importants.

Chapitre VII Investigation sur les systèmes explicatifs : méthodologie

VII.1 Une nouvelle approche

VII.1.1 Dégager les caractéristiques des cadres explicatifs

En accord avec ce que nous avons annoncé à la fin du chapitre III, nous faisons ici le choix d'étudier les systèmes explicatifs des élèves lorsque ceux-ci sont amenés à décrire et/ou expliquer des situations sonores quotidiennes variées. Rappelons que nous appelons *système explicatif* toute structure conceptuelle qui peut être mise en évidence grâce à la production, par les individus, d'invariants dans la description et/ou l'explication qu'ils font des objets et des événements. Ces systèmes explicatifs peuvent prendre la forme des théories naïves de Carey, des p-prims de diSessa, ou encore des *specific theories* ou des *mental models* de Vosniadou (cf. chapitre III).

Bien évidemment, nous ne pouvons espérer mettre en évidence que des éléments partiels de ces systèmes explicatifs dont la complexité est probablement très grande. Pour décrire la façon dont nous pouvons tenter de reconstruire les systèmes explicatifs, nous empruntons à Vergnaud (1990), qui l'a lui-même repris de Piaget, le concept de *schème*²⁶, en le contextualisant quelque peu. La question est finalement de savoir si l'on peut repérer des invariants du raisonnement conceptuel (les schèmes) mis en jeu pour une classe de situations données à interpréter ? Ce sont ces invariants qui sont constitutifs

des systèmes explicatifs. Ce sont bien également ces invariants que recherchent tous les auteurs mentionnés dans le chapitre III. Nous reprenons ici, pour justifier cette stratégie, les propos de Vergnaud (1990), même s'ils prennent place dans le contexte de l'apprentissage des mathématiques et avec un sens donné à la situation un peu plus large que celui que nous lui attribuons (dans notre cas, la situation est essentiellement constituée par les modalités d'interrogation de l'élève et le sujet de la question à laquelle il faut répondre) :

"Il est fécond et légitime de rechercher les parentés et les ruptures à l'intérieur d'un ensemble de situations organisé par les idées elles-mêmes parentes, dans lesquelles les procédures, les représentations et les formulations puissent raisonnablement dériver les unes des autres. Un concept ne prend pas sa signification dans une seule classe de situation, et une situation ne s'analyse pas à l'aide d'un seul concept. Il faut donc se donner comme objets de recherche des ensembles relativement larges de situations et de concepts, en classant les types de relations, les classes de problèmes, les schèmes de traitement, les représentations langagières et symboliques, et les concepts mathématiques qui organisent cet ensemble" (Vergnaud, 1990, p.167).

Ces invariants ne peuvent être identifiés qu'à partir de l'analyse des productions des individus (quelle que soit leur forme), lorsqu'ils sont invités à décrire et/ou expliquer des situations variées. Il nous paraît donc important de proposer pour ceci un ensemble assez large et varié de situations.

La figure VII.1-1 permet de schématiser le processus méthodologique qui permet d'obtenir des informations sur certains éléments des systèmes explicatifs.

²⁶ Vergnaud (1990) définit le "schème" comme *"l'organisation invariante de la conduite pour une classe de situations données"* (p. 136).

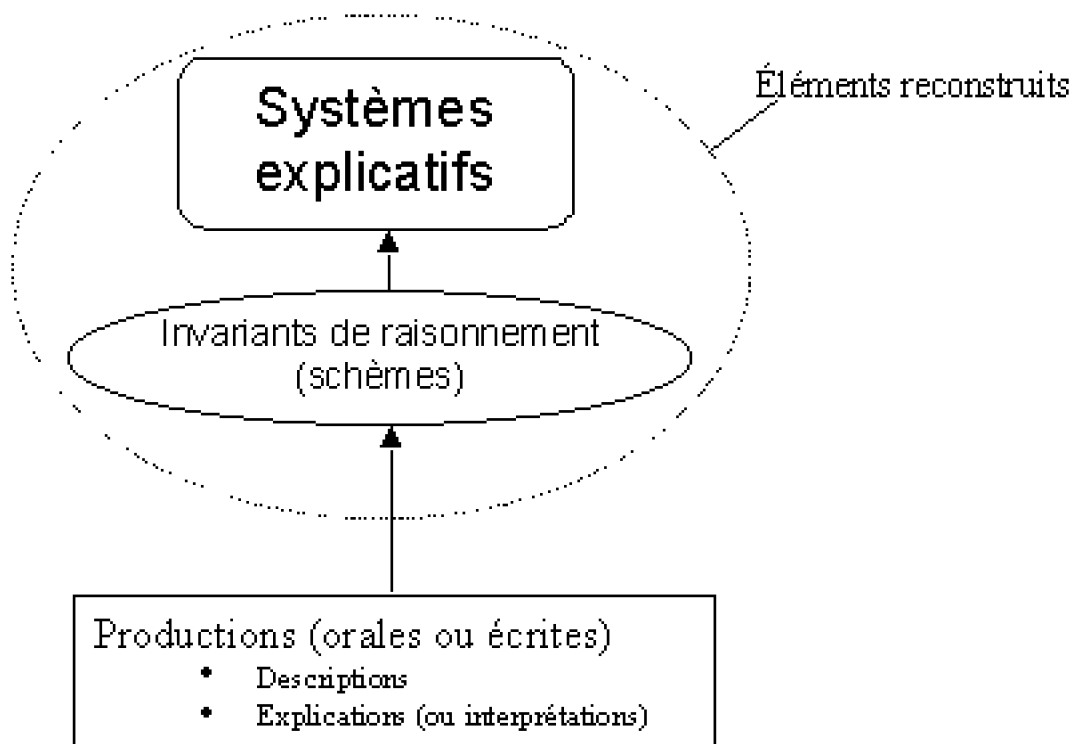


figure VII.1-1 : processus méthodologique permettant d'obtenir des informations sur les systèmes explicatifs par repérage des invariants de raisonnement

En vue de mettre en oeuvre ce processus, nous proposons de soumettre à la description et l'interprétation des élèves **des situations simples et quotidiennes, dont les éléments de réponses ne sont pas forcément contenus dans le savoir à enseigner**. Nous ne questionnons pas les connaissances spontanées des élèves *en physique* mais *au sujet de leur perception des phénomènes de la vie quotidienne*. De plus, **les productions des élèves ne seront pas analysés systématiquement à l'aide de concepts scientifiques** (qui ont de fortes chances de ne pas exister en tant que tels dans les structures conceptuelles des élèves avant enseignement) **mais plus souvent à l'aide d'outils issus d'une analyse phénoménologique du son**.

VII.1.2 Types d'analyses pris en compte pour définir un nouveau champ et de nouveaux outils d'investigation

Une triple réflexion a permis d'élaborer notre expérimentation et de fournir les moyens d'analyse des productions d'élèves (qui seront présentés dans le paragraphe VII.3.) :

L'analyse phénoménologique essentiellement exposée dans le chapitre I. C'est probablement ce point de vue qui est le plus original dans une telle démarche, par rapport à d'autres études sur les conceptions dans le champ de la didactique. Ceci permet de se donner les moyens de mieux connaître la façon dont le champ empirique est perçu, décrit et interprété par les élèves. Ce point de vue phénoménologique permet

de repenser et d'ouvrir le champ expérimental classique étudié par la physique (ou que la physique scolaire reconnaît pouvoir traiter). Il s'agit donc d'un "pas de côté" par rapport au savoir disciplinaire, sans oublier que cet écart devra permettre de dégager des pistes futures pour l'enseignement de la physique au niveau du secondaire.

L'analyse des contenus de la physique (exposés au chapitre II, ainsi que dans la partie B pour certains aspects). Ceci permet entre autre de repérer les notions fondamentales pour le savoir à enseigner et leur éventuelle zone de recouvrement ou compatibilité avec les connaissances qui sous-tendent les phénoménologies naïves. Nous avons pris soin de conserver des liens importants entre les questions que nous mettons en débat dans cette recherche et le savoir à enseigner.

L'analyse des différents types de concepts pouvant être utilisés, des différents types d'explications, des structures conceptuelles spontanées et des conceptions déjà connues (exposées essentiellement au chapitre III).

Les outils d'investigation présentés ici ont également été élaborés à partir des réflexions et des observations que nous pouvions faire dans le cadre des séances d'enseignement proposées par le groupe SOC. Quelques situations ont pu être inspirées par certaines difficultés d'élèves ou formulations orales observées en séances de TP.

VII.1.3 Comment étudier les phénoménologies spontanées ?

Nous avons décrit au chapitre I (§I.2.1) ce que nous entendions par phénoménologie. Nous avons fait le choix de considérer qu'il pouvait y avoir description phénoménologique même lorsque celle-ci met en oeuvre des concepts qui peuvent paraître théoriques. Ce sera par exemple le cas du physicien qui a l'impression de décrire un phénomène même s'il utilise les concepts que la physique met à sa disposition et qu'il maîtrise. Pour un élève avant apprentissage, les concepts en jeu seront probablement moins théoriques mais seront inévitablement issus de la représentation qu'il se fait de la situation, de son passé...

Il y a donc possibilité d'une analyse phénoménologique de toute description et de toute explication produites par les élèves au sujet d'un événement ou d'une situation. Le fait que l'élève fournisse une description de la situation alors qu'il est demandé une interprétation (ou une explication) est déjà un début d'indice de sa phénoménologie. Mais une phénoménologie ne prend réellement sens que lorsqu'il y a existence de phénomènes *pour l'élève*. Il faut donc, pour pouvoir effectivement parler de phénoménologie être capable de repérer si l'élève accepte d'analyser, de redécrire la situation ou l'événement proposé. Si par contre, pour certaines situations, il n'y a que des descriptions paraphrasées ou que des explications d'ordre mystiques ou magiques, alors il sera difficile d'obtenir des indices phénoménologiques à partir de cette situation.

Le physicien peut lui aussi posséder une phénoménologie de la description *et* de l'explication. Au sens du physicien, le *phénomène* est cependant quelque peu différent de ce que à quoi le même terme renvoie dans le langage courant. S'il peut y avoir une relative similitude entre événement et phénomène dans le langage courant, pour le

physicien, en revanche, le phénomène participe déjà d'une unification des descriptions ou des interprétations. Ainsi, le phénomène de propagation permet de décrire et d'interpréter la propagation d'ondes de natures différentes. Le phénomène prend sens, dans ces conditions, dans sa capacité à décrire ou interpréter une classe d'événements (pensons par exemple aussi au phénomène de frottement en physique).

En gardant à l'idée cette distinction entre le physicien et l'élève, nous considérerons pour notre analyse qu'il est possible d'étudier la (ou les) phénoménologie(s) de l'élève grâce à ses productions descriptives ou explicatives en référence à des événements (la notion de phénomène au sens de la physique ne peut émerger de façon consciente que dans un second temps, une fois que des "dénominateurs communs" ou des invariants sont trouvés entre différents événements).

Finalement, nous nous demandons ici quels éléments de phénoménologie (dont il n'a pas forcément conscience) l'élève met en oeuvre dans des situations de description et d'interprétation du champ empirique sonore ? Y a-t-il des conceptualisations, plus ou moins théoriques, qui émergent au travers de différentes situations proposées.

VII.1.4 Questions phénoménologiques

Pour notre investigation, la détermination du champ empirique est essentielle. Nous avons voulu ce champ le plus large possible pour pouvoir capter toute la variété des points de vue sur le son et sur les facteurs qui en conditionne la conceptualisation (cf. chapitre I).

Pour déterminer le champ empirique à explorer, nous partons dans un premier temps de ce que nous appelons des questions phénoménologiques :

1.

Comment peut-on décrire ce qu'on entend ? Cette question étudie les outils mis en oeuvre (au niveau langagier mais pas seulement) par l'élève pour décrire sa perception des sons, ce qu'il s' imagine percevoir ou ce qu'il essaie de décrire objectivement. Cette analyse contribue donc à repérer les sensations auditives mises en oeuvre dans quelques situations de référence. Il semble bien qu'expliquer ce qui est perçu puisse constituer une difficulté pour l'élève, surtout lorsque cette description concerne des sons ou bruits très communs. Ce type de difficultés doit bien sûr être pris en compte dans un processus d'apprentissage et pour des enseignements qui ont parfois tendance à les éluder en proposant la description de sons "préformatés", musicaux et/ou générés électroniquement.

2.

Pourquoi et comment entend-on ? Nous excluons ici du champ d'analyse ce qui concerne les causes physiologiques et cérébrales de l'audition, même si nous laisserons la possibilité à l'élève de répondre de ce point de vue à certaines questions. Nous détaillons ci-après trois questions secondaires qui permettent de préciser ce que nous entendons par ce "Pourquoi et comment".

i.

Grâce à quels mécanismes et à quels phénomènes entend-on ? Si on adopte le point de vue de la physique, il s'agit ici de modéliser ce qui est perçu en mettant en relation

cette perception et quelques paramètres de la vibration, en s'intéressant davantage aux mécanismes de propagation ou de création qui aboutissent finalement à la vibration du tympan, qu'au fonctionnement physiologique de l'oreille. Les connaissances de la physique scolaire mises en jeu ici auraient tendance à être classées selon les éléments de la chaîne sonore : émission, propagation (que s'est-il passé entre ce que j'ai vu là-bas, événement ou objet que je sais être la source, et mon oreille ?), réception (comment fait-on pour entendre, en s'arrêtant à la vibration du tympan). Bien sûr cette analyse en terme de chaîne sonore n'est pas forcément adaptée pour décrire une phénoménologie naïve. On est ici plus ou moins contraint de l'abandonner du fait des situations proposées et de la nature des "objets" qu'on recherche à partir des productions des élèves, mais l'analyse en "chaîne sonore" pourra, comme nous le verrons, constituer une référence utile. En effet, si la plupart des questions posées mettent en jeu au moins deux éléments de la chaîne sonore (parmi émission-crétation, propagation et réception), certaines ne portent que sur l'un de ces points. La question se pose également de savoir si, chez certains élèves, l'un des éléments de la chaîne sonore est prégnant, au sens où il est prioritairement appelé pour décrire ou interpréter toute situation ayant un rapport avec cette question phénoménologique.

ii.

Notre perception change-t-elle avec la source sonore ? Quel(s) dépendance(s) et quel(s) mécanisme(s) ?

iii.

Notre perception change-t-elle dans l'espace ? Quel(s) dépendances(s) et quel(s) mécanisme(s) ?

On retrouve là encore les deux sujets phénoménologiques longuement évoqués dans le chapitre I. La première (2b) s'intéresse aux relations faites entre l'objet identifié comme étant la source sonore (avec ses caractéristiques, taille, matériau constituant, forme ou autre) et la perception du son produit. Les sons en question pourront également avoir une origine humaine (cris par exemple). La question 2c rejoint les problèmes soulevés par Casati & Dokic (1994) concernant ce qu'ils appellent la transparence du milieu (cf. chapitre I). Quels renseignements a-t-on sur la source, connaissant l'espace qui nous entoure ? A l'inverse, quels renseignements a-t-on sur l'espace quand on perçoit un son dont on connaît la source (et sa localisation) ?

3.

i.

Quelle(s) influence(s) la matière a-t-elle sur le son ?

ii.

Quelle(s) influence(s) le son a-t-il sur la matière ?

Nous pouvons, de part leur symétrie, mettre en regard ces deux questions phénoménologiques. La matière est prise ici au sens général : il peut s'agir du milieu de propagation, d'obstacles et même éventuellement de la matière composant une source sonore (même s'il y a alors recouvrement avec la question 2b). Ces questions peuvent

a priori être sous-jacentes à la description et l'interprétation d'une même situation, selon le point de vue phénoménologique adopté par l'élève. Par exemple, lorsqu'on frappe un bol en verre, est-ce le son qui influe sur le verre ou bien le verre (en tant que substance constituante) qui influe sur le son ? De la même façon, lorsqu'on tente de choisir le meilleur matériau possible pour réaliser une isolation est-ce le son qui agit sur la matière ou l'inverse. Au delà du sens de l'action (l'actant est-il le son ou la matière ?) qui sous-tend la causalité en jeu, nous essaierons d'étudier les différents points de vue sur la façon dont a lieu cette action d'une entité sur une autre. C'est cette interaction qui, par exemple, peut fournir des clés au citoyen en proie à des nuisances sonores ou à des problèmes d'isolation phonique.

4.

Quelle est la nature du son ? Les réponses à cette question très vague ne sont pas indépendantes de celles apportées aux questions précédentes. L'idée qu'on se fait de la nature du son conditionne en partie ce qu'on pense de l'interaction du son avec la matière. Cette question n'est donc pas indépendante des autres qui renseignent finalement également au sujet de la nature du son. On questionne ici ce qui constitue finalement les attributs du son, en fonction de la situation proposée. Quelle facette du son est privilégiée (perception ou phénomène physique par exemple), le son a-t-il dans certains cas des attributs matériels, est-il vu comme une onde, est-il assimilé au milieu, etc... Les possibilités au sujet de la nature du son ont largement été débattues dans le chapitre I, et nous avons vu également quelles pouvaient être les conceptions classiques à ce sujet dans le chapitre III.

Les questions phénoménologiques étudiées sont donc très générales et n'ont pas de réponses simples. La physique pas plus qu'une autre discipline seule n'est capable de fournir une réponse complète que seule la sphère savante dans son ensemble, à la limite, pourrait fournir, chaque discipline spécifique contribuant pour une part. Ces questions peuvent cependant avoir un sens pour des non-physiciens parce que formulées dans des termes pas trop techniques et parce qu'il est possible d'y rattacher des faits courants.

Cependant, il n'est pas certain que ces questions seraient comprises par les élèves, et il est encore moins probable qu'elles le seraient systématiquement dans les acceptions que nous venons de décrire. Poser ces questions à un élève amènerait des réponses très partielles, dans des directions extrêmement différentes et qui pourraient finalement s'avérer inutiles pour repérer des traits significatifs des systèmes explicatifs. De plus, dans l'hypothèse que nous adoptons selon laquelle les caractéristiques de la phénoménologie de chacun sont plus facilement révélées par la description et l'interprétation de situations, il convenait de proposer aux élèves des situations concrètes pour obtenir des éléments de réponses à ces questions phénoménologiques. Chaque situation vise l'explicitation d'un ou plusieurs éléments de réponse à l'une ou l'autre des questions phénoménologiques. Par exemple, une question telle que **"Expliquez pourquoi il peut y avoir un son, quand on frappe deux cailloux, quand on frotte quelque chose avec une brosse, quand on pince une corde de guitare, quand on frotte une corde de violon avec un archet"** permet de d'obtenir des indices sur la réponse à la question phénoménologique Grâce à quels mécanismes et à quels

phénomènes entend-on ?.

VII.1.5 Les cadres conceptuels pour rendre compte des différentes facettes du son

La partie A, en particulier le chapitre I, a permis de dégager l'obligation de prendre en compte les différentes facettes phénoménologiques lorsque se pose la question de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique des phénomènes sonores. De façon inévitablement schématique, nous avons en particulier dégagé les deux aspects principaux, à savoir le son comme stimulus perceptible et le son comme phénomène physique analysable et "objectivable". L'aspect phénomène physique recouvre deux sous-catégories qu'il est possible de concevoir facilement et que la physique prend d'ailleurs clairement en compte pour interpréter les phénomènes sonores : ce qu'il se passe au niveau du dispositif émetteur (objet, groupe d'objets...) et ce qui se passe dans le milieu de propagation (ou dit dans des termes courants entre source et récepteur). Ce qui se passe au niveau du récepteur n'est vu par la physique que comme indication de ce qui se passe dans le milieu.

Les questions phénoménologiques ont permis de prendre conscience, par ailleurs, de l'importance de ce "découpage" du concept *son* pour l'analyse phénoménologique à laquelle nous nous proposons de nous intéresser. Nous avons eu en effet l'occasion d'illustrer la possibilité de répondre aux questions phénoménologiques en considérant l'une ou l'autre de ces différentes facettes. Il convient alors, pour pouvoir dégager des tendances dans les systèmes explicatifs des élèves et les analyser, de définir ce que nous appelons des **cadres conceptuels**.

Ces cadres conceptuels sont finalement un outil de repérage de l'aspect du son invoqué dans une production écrite référencée à une situation donnée. Ils sont alors le support, le cadre, dans lesquels vont pouvoir être utilisés des concepts plus ou moins spécifiques à telle ou telle facette du son. Il n'est donc pas étonnant de constater une similitude forte entre les cadres conceptuels que nous dégageons *a priori* et les différentes facettes du concept *son* que ce travail a permis de dégager.

Nous tentons ci-après de caractériser (en langage naturel) les cadres conceptuels (abrégés CC) en guise de définition. Nous avons tenté de leur donner un nom pour des raisons de désignation mais celui-ci est forcément réducteur et pas toujours révélateur de tous les aspects pris en compte dans le cadre conceptuel.

CC1 : le son comme une perception. Ce cadre conceptuel regroupe tous les aspects qui réfèrent à ce qui est perçu auditivement et éventuellement par d'autres canaux sensoriels. Il regroupe également les sensations éprouvées à la suite de la perception sonore, les outils de description de la perception (en particulier langagiers), les influences des variations de perception sur l'idée qu'on se fait du lieu d'écoute, de la situation, de l'objet émetteur. C'est finalement les aspects les plus quotidiens du son qui sont regroupés dans ce cadre conceptuel. Il est important de préciser qu'il n'est pas nécessaire d'entendre réellement pour se placer dans ce cadre conceptuel. L'aspect perceptif des sons peut être décrit par projection dans des situations imaginées (ce sera

le cas pour les situations que nous proposerons).

CC2 : le son lié à une entité hors de la source. mouvement, qui se répand, qui occupe l'espace disponible, qui est assimilé éventuellement au milieu dans lequel elle se déplace. Les aspects d'interaction du son avec la matière et les objets matériels prennent également place dans ce cadre conceptuel (réflexion, écho...). Parce qu'ils peuvent prendre une grande importance dans l'interprétation de certaines situations et parce qu'ils ne sont pas sans poser problème à la modélisation physique du son, nous distinguons deux sous-cadres conceptuels déjà rencontrés dans l'étude des conceptions des enfants (§ III.2.1.2.) :

—

CC2a : le son se déplaçant d'un point à un autre. L'expression prototypique de ce cadre conceptuel est la propagation représentée par un trait allant de l'émetteur au récepteur.

—

CC2b : le son se répandant, se dispersant, rayonnant dans l'espace disponible, de façon éventuellement concentrique.

Ces deux sous-cadres conceptuels ne servent qu'à préciser éventuellement le type de déplacement ou de comportement du son si une telle précision est donnée.

CC3 : le son issu d'une cause événementielle ou matérielle. Ce cadre conceptuel inclut tous les aspects liés à ce qui est identifié comme la cause du son en un endroit de l'espace (sans qu'on soit forcément capable de localiser précisément cette cause). Cette cause-source peut être identifiée à un objet précis, à ses caractéristiques, éventuellement à son comportement. Il peut également s'agir d'une action sur des objets, d'un événement localisé auquel on attribue la source du son.

Nous faisons l'hypothèse que ces cadres conceptuels sont utilisés en réponse à la description ou l'interprétation de toute situation impliquant le son et que cette utilisation est en partie révélatrice des réponses que l'élève apporte aux questions phénoménologiques. Il est bien évident que la situation proposée oriente plus ou moins tel ou tel cadre conceptuel et nous prendrons en compte ceci dans notre analyse *a priori* des questions posées (cf. chapitre VIII). Il est également possible d'utiliser plusieurs cadres conceptuels pour une même situation, par la prise en compte de plusieurs aspects du son.

Nous présenterons dans le paragraphe VII.3 le questionnaire que nous avons élaboré pour connaître un peu mieux les éléments de réponses des élèves à ces questions phénoménologiques un peu complexes. Il n'est pas question d'espérer avec ce questionnaire dégager des phénoménologies élaborées, complètes en réponses à toutes ces questions. Nous ne pourrions dégager que quelques grandes tendances dans les systèmes explicatifs, issues, quoi qu'il arrive, d'une certaine reconstruction de notre part. Les questions posées constituent de bonnes balises pour avancer sur la voie que nous nous sommes fixée. Nous détaillons ci-après les points que nous cherchons à éclairer précisément à l'aide du questionnaire proposé aux élèves.

VII.2 Problématique

VII.2.1 Explication contingente à la situation ou phénoménologie explicative globale ?

Une des questions de recherche mentionnée au chapitre IV s'intéressait à l'influence des situations proposées à la description et à l'interprétation sur les systèmes explicatifs mis à l'oeuvre par les élèves. Nous revenons maintenant sur cette question en précisant davantage les moyens que nous nous donnons pour tenter d'y répondre. Nous n'oublions pas non plus que, symétriquement, les structures conceptuelles de l'élève peuvent influencer la "lecture" qu'il fait de la situation.

Nous nous posons ici la question de la variabilité des structures conceptuelles utilisées par rapport aux situations proposées. Finalement, les élèves ont-ils des structures de pensée suffisamment fortes et efficaces pour être utilisées en référence à un grand nombre de situation ou bien les interprétations restent-elles relativement peu conceptualisées et finalement extrêmement proche de la situation ?

Nous cherchons donc à observer l'utilisation des invariants de raisonnement (cf. § VII.1.1) sur des situations variées. Ces invariants sont-ils suffisamment conceptualisés pour être utilisés dans des contextes variés ou bien sont-ils trop proches de la situation matérielle proposée pour pouvoir être utilisés en référence à d'autres situations.

L'outil "cadre conceptuel" est un des moyens qui nous paraissent utiles pour donner des éléments de réponse à ce genre de question. Cependant, nous avons bien conscience que la situation proposée contraint forcément l'utilisation d'un cadre conceptuel plutôt qu'un autre. C'est ce que nous abordons dans le paragraphe suivant.

VII.2.2 Écart par rapport au(x) cadre(s) conceptuel(s) induit(s)

Nous appelons *cadre conceptuel induit* par la situation le cadre conceptuel dont des éléments sont de fait questionnés dans le problème posé à l'élève. Il est bien évident, par exemple qu'une situation évoquant un son qu'on entend moins fort lorsqu'on recule induit une réponse plutôt en terme de "son hors source" (cadre conceptuel 2) puisque l'évolution de la perception est décrite et que la seule autre modification est le recul dans l'espace. Cependant, il est possible d'envisager des réponses qui invoquent la source ou le récepteur comme cause de cette évolution ou qui remettent en cause la perception. Ce type de production constitue alors ce que nous appelons un écart au cadre conceptuel induit.

Ces écarts nous semblent révélateurs d'une certaine difficulté à interpréter et conceptualiser les situations sonores à l'aide du cadre conceptuel pourtant induit. La raison de telles difficultés pourrait par exemple être imputée au caractère quotidien du son (cf. chapitre I et § IV.1.). Il est à ce sujet raisonnable de penser que ce n'est pas l'adoption du cadre conceptuel n°1 qui la plus fréquente puisqu'il est le plus proche de l'approche quotidienne des sons.

Certaines questions n'induisent par contre pas vraiment de cadre conceptuel mais visent au contraire, pour un problème relativement précis sur le son, à observer le cadre conceptuel qui prédomine au sujet du son (c'est par exemple le cas de la question sur les lieux d'existence possibles du son).

Cette problématique nous impose évidemment, quand c'est possible d'explicitier dans notre travail les cadres conceptuels induits par les questions posées (et en particulier par les situations proposées). Ce travail sera présenté au paragraphe VII.4.2.

VII.2.3 Niveau de savoir adopté

Le chapitre III a permis de présenter des outils théoriques pour distinguer ce qui caractérise un concept plutôt scientifique d'un concept plutôt quotidien. Nous avons également vu les différences qui pouvaient exister entre explications scientifiques et explications de la vie quotidienne. Nous nous posons ici la question du type de concepts et d'explications avancés en réponse aux questions que nous avons posées aux élèves. Ce travail théorique nous permet d'adopter quelques **outils d'analyse des productions** des élèves à ce sujet. C'est ainsi dans la production des élèves que nous repérons le niveau de savoir adopté.

De plus, les hypothèses n°1 et n°2 du chapitre IV relatives à la quotidienneté des phénomènes sonores ont mis en avant la variété, plus forte que dans d'autres domaines de la physique, des types d'explications et de descriptions. En particulier, se pose la question des conditions de construction de faits bruts ou de faits scientifiques (cf. chapitre IV) à partir des situations proposées.

Les situations seront-elles interprétées uniquement à partir de l'intuition sensible, ce qui peut parfois leur conférer un caractère d'évidence pour lequel il n'y a rien à expliquer ? Dans ces conditions, une description fait parfois, dans l'esprit de l'élève, office d'explication. Les explications fournies seraient alors *primitives* (Guillaud, 1998). Guillaud définit les explications primitives dans le cas de la mécanique comme des **"explications que l'on peut modéliser sous la forme de structures de connaissances dans lesquelles les sujets mettent en relation une cause et une description primaire du mouvement"**, p.96. Ces explications sont faites en termes courants, en restant très proche des objets et des événements, et en s'instanciant dans la situation (p. 95). La causalité linéaire causale entre objets et/ou événements est une modalité classique de ce type d'explication. Dans les cas de questions ne proposant pas de situations concrètes, ce type d'explication ne peut plus apparaître, à moins, ce qui est possible, que l'élève propose une explication sur une situation matérielle qu'il propose lui-même.

A l'inverse, les situations peuvent être décontextualisées par utilisation de concepts scientifiques et de relations entre ces concepts. Nous pouvons repérer les niveaux de savoir utilisés par l'utilisation des concepts et des causalités qui apparaissent dans les réponses des élèves. Un exemple important de différence de niveau de savoir adopté est par exemple le mode de description des paramètres du son. Pour décrire les propriétés du son (quelque soit le cadre conceptuel adopté), l'élève peut utiliser de notre point de vue deux types de termes, révélateurs du niveau de savoir visé :

Les descripteurs perceptifs : fort/faible, aigu/grave, atténué, étouffé, strident, court...

Les propriétés : amplitude, intensité, fréquence, puissance, tonalité, volume, vibration, vitesse, propagation...

Nous estimerons dans notre analyse que les propriétés sont plutôt de l'ordre du concept scientifique, même s'ils ne sont pas utilisés vraiment comme tel ou comme le physicien le ferait (il confère au moins au propos une "apparence" scientifique qui dénote de la part de l'élève une volonté de se dégager de la situation même s'il n'y parvient pas). Cette distinction sera explicitement faite pour l'analyse des réponses à certaines questions. Elle nous paraît assez révélatrice des différences qu'il est possible de signaler dans le niveau de savoir adopté pour répondre.

Il reste à voir alors comment le niveau de savoir peut évoluer après un enseignement sur le sujet.

VII.2.4 Évolution avant / après et comparaison SOC / non SOC

Certaines de nos questions de recherche (chapitre IV) se placent dans une perspective d'évolution au cours de l'apprentissage. Nous souhaitons en particulier observer si certaines situations sont plus propices que d'autres à une évolution de niveau de savoir utilisé (§ IV.1.1). De façon générale, nous souhaitons estimer l'effet d'un enseignement donné sur les systèmes explicatifs mis en oeuvre dans la description et l'interprétation de situations *identiques* entre l'avant et l'après, ce qui n'est quasiment jamais fait dans l'enseignement (voir les questions de recherche sur ce sujet au § IV.2.).

Il est donc indispensable de comparer les réponses des *mêmes* élèves aux *mêmes* situations. Seules quelques questions (en faible nombre) ne sont présentes qu'avant ou qu'après enseignement, pour des raisons que nous exposerons au cas par cas (chapitre suivant).

Comme déjà annoncé, nous avons également souhaité, par ce biais, fournir des outils de caractérisation et de validation de l'enseignement proposé par le groupe SOC. En comparant l'évolution pour un groupe témoin (pour lequel on considère qu'il a été dispensé un enseignement "normal" ou "standard") et celle du groupe expérimental (ayant suivi la progression SOC). Sans redécrire ici les spécificités de cette progression, nous pouvons quand même indiquer que cette stratégie pourra permettre d'évaluer l'effet d'un enseignement accordant une place privilégiée à la modélisation. L'influence de telles activités de modélisation ne peut pas se mesurer sur des évolutions dont le grain serait uniquement la situation-problème isolée. Pour adopter une approche développementale à ce sujet, les quelques mois pendant lesquels l'enseignement a eu lieu paraissent plus adaptés. Sur une telle échelle de temps (de l'ordre de 4 mois), nous pouvons raisonnablement penser que les effets de l'apprentissage prédominent largement sur les effets liés au développement cognitif dans l'évolution éventuellement constatée.

A partir de maintenant, pour éviter les confusions avec le groupe de recherche-développement SOC, le groupe d'élèves ayant suivi la progression SOC sera

appelé *population SOC* (l'autre étant appelé *population témoin* ou *non-SOC*).

VII.2.5 Lexique et évolution lexicale

Le paragraphe VII.2.3 a permis d'illustrer, sur un exemple important, le rôle des termes lexicaux pour donner des indications sur le niveau de savoir utilisé par l'élève dans leurs productions. Cette approche lexicale occupe une place importante dans notre recherche. D'une part elle est effectivement un mode d'analyse des réponses des élèves pour certaines questions. D'autre part, nous relèverons dans les productions la présence de certains mots d'une liste élaborée préalablement et qui fera l'objet d'une expérimentation spécifique. Ceci sera l'objet du chapitre IX dans lequel, en particulier, le choix de cette liste sera justifié. Dès maintenant, nous devons cependant donner cette liste puisque l'analyse lexicale (plus exactement la description des données chiffrées) sera fournie pour chaque question avant même d'aborder la chapitre IX. La liste, que nous appellerons dorénavant la liste *L* (pour *lexique* ou *langue*), est la suivante : volume, intensité, fréquence, vibrer (ou vibration), émettre (ou émetteur ou émission), recevoir (ou récepteur ou réception), se propager (ou propagation), résonner (ou résonance), aigu, grave, son.

VII.3 Présentation du questionnaire et de la population

VII.3.1 Étude critique de la technique du questionnaire

Au regard des objectifs que nous nous sommes fixés, il convient alors de mettre au point une stratégie de recueil d'information. Pour préciser quelque peu ce que nous entendons par recueil d'information, nous reprenons à notre compte la définition qu'en donne de Ketele (1996) qui nous paraît bien éclairer notre stratégie :

Le recueil d'informations peut être défini comme le processus organisé mis en oeuvre pour obtenir des informations auprès de sources multiples en vue de passer d'un niveau de connaissance ou de représentation d'une situation donnée à un autre niveau de connaissance ou de représentation de la même situation, dans le cadre d'une action délibérée dont les objectifs ont été clairement définis, et qui donne des garanties suffisantes de validité. (De Ketele, 1996, p.16)

Pour mener à bien le recueil d'information, le questionnaire est devenu une technique classique de la recherche en didactique pour mieux connaître les connaissances initiales et leur éventuelle évolution au cours du développement ou à l'issue d'un apprentissage. Comme d'autres techniques, elle comporte inconvénients et avantages qui ont été l'un comme l'autre largement étudiés (par exemple De Ketele, 1996).

Commençons par les défauts majeurs. Nous avons bien conscience de la contrainte que fait peser la production écrite. Comme nous l'avons vu dans la partie B, cette contrainte n'est pas forcément néfaste pour la réflexion et la conceptualisation puisqu'elle fait pleinement partie des processus cognitifs en jeu. Par contre elle limite la taille de la quantité d'informations pour des raisons temporelles mais également matérielles (la place pour répondre sur la feuille était dans notre cas relativement limitée). De ce point de vue la technique de l'interview est bien supérieure mais a d'autres inconvénients que n'a pas

le questionnaire. Par exemple, le questionnaire empêche l'ouverture que permet l'interview (s'il n'est pas trop fermé). Les questions peuvent certes être ouvertes mais l'ordre chronologique est imposé et l'élève est finalement fortement guidée dans la succession des situations et des sujets abordés.

Il ne faut pas non plus sous-estimer le fait que la question posée n'est pas un instrument qui permet d'observer sans perturber ce qui est observé. De la même façon que l'instrument de mesure perturbe, même de façon minime, ce qu'il mesure, le questionnaire perturbe le sujet questionné et les raisonnements qu'il met en oeuvre. Pour reprendre une métaphore de Laurence Viennot (1994), les idées, concepts et modes de raisonnement sont similaires à des objets dans des tiroirs que l'on peut ouvrir par les clés que sont les questions posées²⁷. Formuler des questions qui, en ouvrant le tiroir, n'y dépose rien n'est pas une chose aisée. Il ne s'agit pas de nier ceci mais au contraire de le prendre en compte. Les productions des élèves sont faites en référence à une situation donnée et la généralisation à d'autres situations doit absolument être questionnée. Ceci constituera d'ailleurs une de nos questions de recherche. Nous adopterons pour cette raison une grille d'analyse précise pour chaque question, en privilégiant donc comme le propose Viennot (1994) ou Chauvet (1996), de repérer les couples questions-éléments de réponse. Ce sera alors le travail du chercheur de dégager, à partir de ces couples, les grandes tendances de raisonnement et de conceptualisation, par observation simultanée des réponses à diverses situations corrélées *a priori*. Il s'agira de dégager la cohérence éventuelle des raisonnements et conceptualisations à travers le plus grand nombre possible de situations empiriques.

Au niveau des avantages maintenant, le premier qu'il convient de mentionner est la possibilité offerte, dans un temps raisonnable, de traiter les productions d'un échantillon relativement important. Pour pouvoir dégager de grandes tendances, il faut en effet pouvoir s'appuyer sur un nombre significatif d'élèves, sans que ceci implique forcément une analyse statistique poussée (tout dépend de ce qu'on souhaite étudier). La méthode de l'interview est en ce sens beaucoup plus lourde, privilégiant le grain d'analyse au détriment de l'indépendance entre résultats et individu. Sur un sujet comme le nôtre, il est important de pouvoir disposer de réponses en nombre. C'est l'ensemble des réponses qui pourra permettre de dégager des tendances pour définir des invariants de raisonnement.

Cet ensemble de productions recueillies permet également de mener les investigations auprès de publics variés, en adéquation avec le public actuel des lycées français. Ceci est primordial si l'on veut pouvoir proposer des pistes de réflexions pour l'enseignement, d'autant plus lorsqu'il s'agit d'un sujet où le vécu quotidien est appelé à jouer un rôle majeur.

Selon la classification de de Ketele (1996), le questionnaire que nous proposons est donc à mi-chemin entre contrôle de connaissances et enquête. Il contrôle les connaissances au sens où il s'intéresse à l'individu (ou se donne au moins les moyens de mener des analyses individuelles), il est une enquête dans la mesure où c'est bien une

²⁷ Nous ne faisons pas dire plus qu'elle ne dit à cette métaphore. En particulier, il ne faudrait pas en déduire que le cerveau est un contenant dont on pourrait tirer (comme des tiroirs) telle ou telle connaissance ou dans lequel on pourrait mettre des connaissances.

population qui est la cible de nos recherches (enquête est entendu au sens **"d'une étude d'un thème précis auprès d'une population dont on détermine un échantillon afin de préciser certains paramètres"** (De Ketele, 1996, p. 31)). Signalons également que parmi la taxinomie que De Ketele propose des activités repérées dans un contrôle de connaissances, nous cherchons à observer plus particulièrement :

- le savoir-redire (un message ou une information apprise sans la modifier de façon significative) ;

- le savoir-faire cognitif ;

- le savoir-être (au sens où nous observons la façon dont l'élève appréhende la situation en s'y projetant éventuellement, la façon dont il sélectionne les traits qui lui semble pertinent, la représentation qu'il adopte...).

- Bien sûr, la technique du questionnaire (malgré ce qui vient d'être dit, nous adoptons dorénavant ce terme) ne doit pas, si possible, être la seule utilisée pour recueillir l'information. Dans la mesure du possible, il convient d'exploiter la variété des techniques, aussi bien pour élaborer le questionnaire, pour établir les grilles d'analyse que pour analyser effectivement les résultats. Nous verrons plus loin que nous avons en partie adopté une telle stratégie.

VII.3.2 Description du questionnaire et de son élaboration

VII.3.2.1 Processus d'élaboration

L'idée d'un questionnaire inséré à la progression proposée par le groupe SOC était déjà acquise lorsque nous avons entrepris le présent travail. Ce questionnaire était assez lié au savoir à enseigner en classe de seconde et était ainsi par certains côtés inadapté pour orienter les recherches vers les phénoménologies spontanées des élèves. Les premiers résultats qu'il a pu fournir, ainsi que les nombreux échanges avec des enseignants ont permis de mener les réflexions plus théoriques que nous avons détaillées dans la partie A, en particulier au sujet de la phénoménologie du son. Dans le même temps, nous continuions à observer l'activité d'élèves travaillant en binômes durant toutes les séances de TP proposées par le groupe SOC. Andrée Tiberghien a également mené quelques entretiens avec des élèves de fin de troisième au sujet de phénomènes sonores très simples. Ceci a permis de mieux percevoir le champ des possibles au sujet des mécanismes explicatifs des élèves arrivant en seconde. C'est cette articulation constante entre réflexion théorique et expérimentations courtes préalables qui a permis d'élaborer les questions phénoménologiques à explorer (§ VII.1.4) et les situations à proposer aux élèves. Il ne faut pas non plus oublier la prise en compte des situations proposées dans les travaux de recherche déjà cités sur les conceptions (en particulier l'approche de K. Mazens auprès des enfants nous a paru fructueuse pour notre sujet) ou de mémoires

professionnels d'IUFM (par exemple Varaine & Treillard, 1998) pour choisir quelques situations que nous adaptions ensuite.

Un long travail de tests des questions sur des échantillons d'abord restreints, puis un peu plus gros (de l'ordre d'une classe) a alors débuté. Nous cherchions à nous assurer de la compréhension des questions par le plus grand nombre. Il s'agissait également de tester la possibilité de traitement de la question par les élèves, en regardant s'ils pouvaient exprimer des idées sur la situation où s'ils la trouvaient trop compliquée ou trop vague au point de ne pouvoir donner aucun élément de réponse. Cette phase était également l'occasion de tester, dans la mesure du possible, la possibilité de traitement des réponses avec une grille "objective" au sens où elle pourrait être utilisée par n'importe quel chercheur du domaine.

Durant cette phase de test (quelques mois), nous sommes également allés soumettre le questionnaire à d'autres publics : adultes de l'Université Tous Âges, étudiants en DEUG non scientifique, quelques étudiants en DEUG et IUT scientifiques ainsi que quelques collégiens de 5^e. Les questionnaires pouvaient évidemment subir quelques variations d'un public à l'autre. Cette stratégie fut très utile en nous permettant de faire émerger des traits variés des systèmes explicatifs qui pouvaient être source d'idées pour les situations à proposer. De plus, elle enrichissait constamment notre réflexion plus théorique sur la phénoménologie du son.

Après les dernières modifications faites pour permettre un codage efficace et transmissible, le questionnaire était prêt.

VII.3.2.2 Description du questionnaire

Le questionnaire possède 16 questions avant enseignement, 17 après. Onze questions sont communes aux deux passages. L'ordre des questions est fixé de façon à minimiser l'apport d'information donné par un énoncé pouvant intervenir dans la réponse à une question ultérieure. Les deux questionnaires sont donnés dans leur version intégrale dans les annexes.

Le tableau VII.3-1 se contente de mentionner l'énoncé de la question quand elle est courte (en italique) ou de façon plus synthétique la situation et ce qui est demandé (ceci permet d'assurer le repérage rapide de la question). La colonne de gauche donne la désignation des questions utilisée par la suite (par des lettres). Les questions nommées en gras et sur fond grisé sont celles dont nous détaillerons l'analyse et les résultats dans le prochain chapitre. Les deux colonnes de droite indiquent la présence (case grisée) ou non (case vide) dans les questionnaires passés avant et après enseignement. Le numéro indiqué est celui que la question occupe dans le questionnaire.

Quand la question propose un choix multiple, elle est toujours complétée par une demande de justification ou d'explication du choix. Quand il n'y a pas de choix multiple, la question est entièrement ouverte.

Tableau VII.3-1 : description synoptique des deux questionnaires

		avant	après
A	<i>"Citez 4 mots que vous associez au son."</i>	1	1
B	"Dans la situation ci-dessous, le téléphone sonne. Les deux personnages entendent-ils le même son ? Expliquez votre réponse."	2	2
C	<i>"Est-ce qu'un son, ça se déplace ? Justifiez en donnant éventuellement un exemple."</i>	3	
D	Concert en plein air. Explication de "plus on recule, moins on entend fort".	4	3
E	<i>"A votre avis, si un son est émis plus fort qu'un autre, est-ce qu'il va plus vite ?"</i>		4
F	Influence d'un mur sur le son perçu	5	
G	Lieu d'existence du son	6	5
H	Cause du son en frappant un verre ou une table.	7	6
I	Cause du son quand on frappe (deux cailloux), frotte (brosse, violon), pince (guitare)	8	7
J	Influence d'une boîte étanche	9	8
K	<i>"On frappe avec la même force à deux portes, l'une en bois, l'autre en fer. Comparez les deux sons qu'on entend alors."</i>	10	
L	Ambulance qui se	11	9

		avant	après
	rapproche. Explication du son plus aigu.		
M	Comparaison vitesse du son/vitesse de la lumière. Exemple pratique.		10
N	<i>"Donnez une condition obligatoire pour faire un son"</i>	12	11
O	Écho: test de plus fort/plus vite /plus long, plus aigu/plus vite /plus long	13	12
P	Milieus de propagation possibles		13
Q	Description microscopique	14	14
R	Matériau adapté pour isolation domestique	15	15
S	Localisation de la cause d'un son plus aigu (vibration source ou milieu ?)	16	16
T	Modélisation de la vibration (niveau acoustique, hauteur, timbre).		17

Nous avons cherché à faire en sorte que le maximum de questions soient présentes dans les deux questionnaires, mais ceci n'a pas été possible pour toutes les questions. Les choix de présence ou d'absence d'une question dans l'un ou l'autre des questionnaires seront détaillés au cas par cas dans le chapitre suivant (pour les questions étudiées). Ils sont le résultat de la prise en compte des éléments suivants :

compréhension de la question au moment considéré (par exemple, la question T évoquant les concepts d'amplitude, fréquence, hauteur... ne nous semblait pas intéressante avant enseignement dans la mesure où ces concepts pouvaient ne jamais avoir été rencontrés) ; de façon plus générale, la présence de questions impliquant des éléments conceptuels de l'ordre du modèle ou de la théorie n'avait pas de sens avant enseignement ;

nécessité de proposer des situations posant *a priori* problème, dont la réponse n'est pas

évidente pour la population considérée (par exemple, la question C **"Est-ce qu'un son ça se déplace"** semblait trop évidente après enseignement et n'apportait pas des informations très fructueuses) ;

temps de passage (nous ne pouvions pas nous contenter d'ajouter des questions au questionnaire *avant* pour constituer le questionnaire *après* puisque les deux devaient pouvoir être passés dans l'heure).

Une analyse globale des questions est proposée dans le paragraphe VII.4 La question A, de nature très différente des autres ne sera abordée que dans le chapitre IX.

VII.3.3 Contexte de passage

VII.3.3.1 Insertion dans la progression

Le questionnaire a été passé par des élèves de seconde avant et après enseignement de la partie "Sons et ultrasons". Treize de ces vingt classes ont suivi l'enseignement proposé par le groupe SOC (dont trois classes pour les trois premiers TP seulement). L'appel aux enseignants s'est déroulé de la façon suivante : nous étions d'une part en contact avec certains enseignants (pratiquant généralement la progression SOC), nous avons d'autre part utilisé la liste de diffusion de sciences physiques de l'Académie pour élargir notre échantillon et proposer le questionnaire à d'autres enseignants. Les réponses furent largement suffisantes.

La majorité des enseignants ayant choisi la progression SOC avaient avant même que nous leur propositions un questionnaire, l'intention de faire passer le questionnaire (plus court) proposé dans les documents du groupe SOC. Il n'y a donc pas eu de modification de la structure de la progression lorsque nous avons proposé à ces enseignants de remplacer le questionnaire prévu par celui que nous avons élaboré à des fins de recherche. La seule différence tenait à la longueur nécessaire à la passation : une heure complète pour notre questionnaire alors qu'il fallait environ moitié moins de temps pour le questionnaire "SOC".

Pour les enseignants qui ne pratiquaient pas la progression SOC, les changements étaient plus importants. Nous leur propositions cette séance comme une séance d'introduction à la partie sur le son et comme un moyen donné aux élèves d'éveiller leur curiosité et de se poser quelques questions avant d'aborder le sujet. Les enseignants devaient accepter deux passations, avant et après enseignement. Le deuxième et dernier passage était présenté comme un moyen pour l'élève de faire le point sur sa progression personnelle et sur ce sur quoi la physique lui avait apporté des outils utiles. Dans tous les cas, nous insistions sur le fait que le but n'était pas d'évaluer les élèves ou, à travers eux, l'enseignement dispensé.

Malgré ces précisions, le fait qu'il y ait des questions pour lesquelles le savoir à enseigner n'apporte pas *a priori* d'éléments de réponse a parfois inquiété les enseignants. Beaucoup d'entre eux, à la lecture du questionnaire faisaient rapidement remarquer que leurs élèves ne seraient pas forcément capables de donner la réponse, même après

enseignement. La "difficulté" ou le caractère "vague" de certaines questions étaient également souvent mentionnés. Loin de nous inquiéter ces remarques étaient prévisibles dans la mesure où c'est sciemment que nous nous sommes écartés du savoir à enseigner et de situations précises comportant tous les paramètres pour résoudre le problème, comme c'est souvent le cas dans un exercice de physique. Après discussion, les enseignants ont tous accepté.

Que ce soit lors du premier ou du deuxième passage, il pouvait s'en suivre une petite discussion avec les élèves et l'enseignant. Le questionnaire semblait ainsi convenablement jouer son rôle d'ouverture et de fermeture du sujet.

VII.3.3.2 Présentation aux élèves

L'intrusion d'une tierce personne dans la classe est toujours un moment particulier pour les élèves. La situation de classe est de suite différente, oscillant entre détente accrue et observation intriguée. Après avoir éventuellement présenté le chercheur à ses élèves, le professeur lui laissait généralement la charge de la présentation de la séance et du questionnaire.

Le questionnaire était présenté comme une introduction à la partie du programme sur les sons qui allait commencer juste après (généralement à la séance suivante), comme un moyen de se poser quelques questions et d'éveiller éventuellement sa curiosité. Les éléments suivants étaient systématiquement fournis aux élèves :

Le questionnaire est une enquête sur la façon dont les gens décrivent, interprètent les phénomènes sonores ou plus généralement tout ce qui concerne le son. A terme, ce genre d'enquête permet de mieux comprendre comment les gens apprennent la physique sur ce sujet.

Il n'y a pas de réponses vraies ou fausses, il ne sert à rien de chercher la *bonne* réponse. Les questions sont parfois volontairement floues. Même un physicien ne sait pas forcément répondre à certaines de ces questions. Ce qui compte, c'est l'avis de l'élève et en ce sens il faut voir le questionnaire comme un sondage. Les réponses doivent être les plus spontanées possibles ce qui n'empêche pas de prendre le temps nécessaire pour répondre.

Une conséquence est que le travail ne peut pas être noté et qu'il ne sert à rien de copier une réponse qui n'est pas la sienne sur la feuille de son voisin.

Ce dernier point est très important puisque l'évaluation semblait souvent être une inquiétude pour une assez grande partie des élèves dès l'instant où ils avaient compris qu'ils devaient remplir un questionnaire.

Sauf si l'enseignant s'y opposait (ce qui arrivait, mais rarement), le passage était anonyme. L'enseignant souhaitait dans la plupart des cas avoir une copie des productions des élèves (surtout avant enseignement), même anonyme. Quand ce n'était pas le cas, il

était précisé aux élèves que leurs réponses seraient uniquement visibles par le chercheur.

Les élèves étaient prévenus du passage futur d'un questionnaire quasiment identique après enseignement²⁸. Les consignes ci-dessus étaient rappelées lors du passage final.

A la fin du deuxième passage, nous rendions aux élèves une copie de leur première production. Ils pouvaient ainsi, s'ils le désiraient estimer eux-mêmes l'évolution de leurs réponses à des questions identiques.

Des consignes d'ordre matériel étaient ajoutées :

- . utiliser de l'encre non-effaçable, les ratures sont non seulement autorisées mais doivent être faites explicitement ;
- . répondre si possible à toutes les questions, dans l'ordre où elles sont présentées (interdiction de retour en arrière). Indiquer "je ne sais pas" plutôt que laisser un blanc ;
- . remplir les quelques renseignements en fin de questionnaire ;
- . notez sur la feuille chaque fois qu'un mot ou une question n'est pas compris(e).

Il n'est pas possible de vérifier systématiquement que toutes ces consignes ont été respectées (en particulier la consigne interdisant de revenir sur une question antérieure). Cependant, il semble que la grande majorité des élèves s'y soit conformée. C'est probablement la consigne en référence à la copie sur les voisins qui a été la moins bien respectée. La pratique scolaire induit une nécessité de répondre, quoi qu'il arrive. Le fait que l'exercice ne soit pas noté a pu diminuer la contrainte habituelle d'un travail personnel. Les classes où, malgré la surveillance, les échanges ont paru relativement nombreux n'ont pas été intégrées à l'échantillon étudié.

Le temps nécessaire pour répondre est extrêmement variable. Les plus rapides ont estimé avoir terminé après environ 25 minutes (dans ce cas, généralement, les réponses sont courtes et souvent absentes), les plus lents n'avaient pas tout à fait le temps de terminer dans l'heure. Le temps moyen se situe autour de 45-50 minutes.

Les questions posées en fin de questionnaire sur le jugement de difficulté du questionnaire permettent d'obtenir les indications regroupées dans le diagramme VII.3-1 :

²⁸ Cette consigne aurait pu inviter les élèves voulant réaliser une performance à retenir leur première réponse ou les énoncés des questions. Il semble qu'aucun élève ne se soit livré à ce genre d'exercice (essentiellement par manque de temps d'ailleurs).

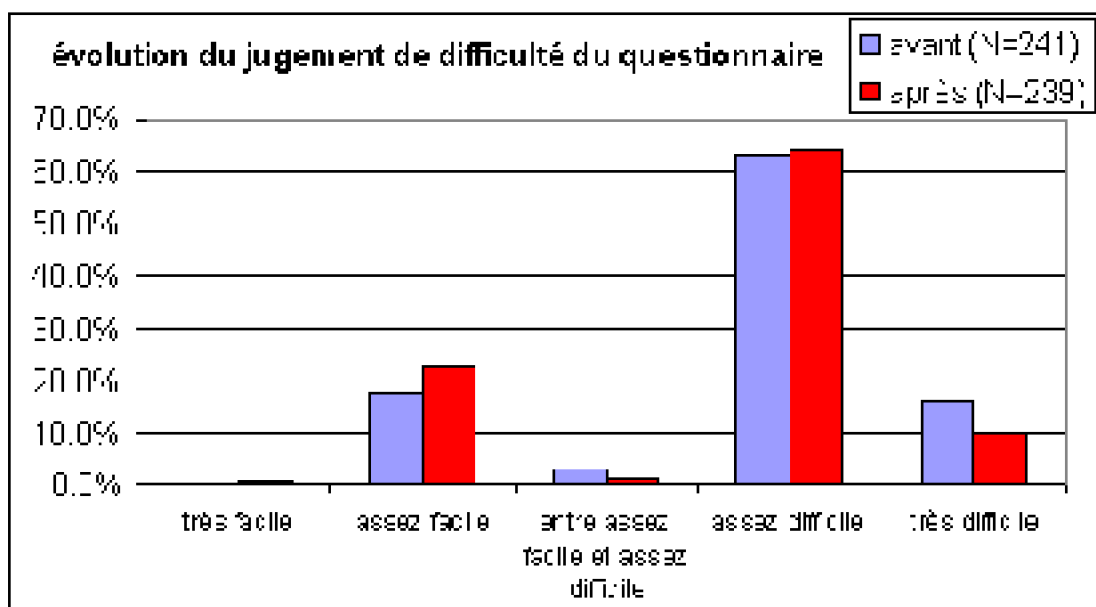


diagramme VII.3-1 : un questionnaire plutôt jugé assez difficile et une faible évolution

Nous voyons donc que le questionnaire est jugé assez difficile ou très difficile par les trois quarts des élèves environ (avant enseignement, 81% des non redoublants, et 71% des 'redoublants cochent une de ces deux cases) et que ce pourcentage diminue assez peu. C'est là une confirmation du caractère non scolaire du questionnaire proposées (ou des situations qu'il propose).

Notons enfin quelques impressions exprimées par les élèves après le passage, qui nous paraissent assez révélatrices de la nature du questionnaire, sans prétendre pour autant à une valeur représentative : **"c'est bizarre", "les questions ne sont pas assez précises", "ça fait se poser des questions"...**

VII.3.4 Population étudiée

Au total, 20 classes de seconde de l'académie de Lyon ont passé le questionnaire avant et après enseignement (645 élèves avant, 649 après). Notre échantillon (celui que nous avons étudié) est un sous-ensemble de cette population. En effet, pour des raisons diverses nous avons effectué un tri à partir de ces 20 classes. D'une part il n'était pas envisageable dans le temps imparti pour ce travail de dépouiller près de 1300 questionnaires. D'autre part, certaines classes semblaient ne pas avoir suffisamment respecté les consignes pour que nous puissions considérer les réponses des élèves concernés comme valides pour notre expérimentation : certains élèves sont vite démotivés, les échanges sont assez nombreux entre voisins... Nous avons également exclu de l'échantillon les classes pour lesquelles le passage n'était pas anonyme. Nous avons enfin cherché à obtenir un échantillon de population qui nous paraissait représenter d'une part le niveau moyen des classes de seconde, d'autre part la diversité des milieux socio-culturels²⁹.

L'échantillon retenu est composé de 8 classes de seconde. Il est décrit dans le tableau VII.3-2 :

Tableau VII.3-2 : profil de la population étudiée

	avant	Après	Nombre total d'élèves concernés
Filles	151 (61%)	157 (63%)	159 (62%)
Garçons	96 (39%)	94 (37%)	98 (38%)
Total	247	251	257*
Nombre de redoublants	36 (15%)	38 (15%)	40 (16%)
Population témoin (non-SOC)	129 (52%)	130 (52%)	133 (52%)
Population "SOC"	118 (48%)	121 (48%)	124 (48%)
* 241 élèves ont passé les 2 questionnaires			

Sur les 8 classes concernées, 2 sont jugées "faibles" par leur enseignant, 3 "moyennes" et 3 "plutôt bonnes", ceci concernant la discipline "Sciences physiques". Environ 80 élèves (à peine un tiers de l'échantillon) ont poursuivi (ou avaient des chances de la faire) dans une filière scientifique (1^{ère} S). Le niveau de l'échantillon semble donc assez moyen et nous tenions à travailler avec une telle variété et avec des élèves pas forcément étiquetés comme "scientifiques".

Les 8 enseignants concernés ont choisi de traiter les 3 parties de physique dans l'ordre chronologique présenté dans le programme (électricité, sons, lumière). Ainsi, lors du passage après enseignement, nous avons demandé dans 5 classes (pour des raisons d'organisation cela n'a pas été possible dans 3 classes) ce que les élèves avaient préféré parmi l'électricité, le son ou la chimie (de façon globale depuis le début de l'année). Les résultats, indicatifs, sont les suivants (tableau VII.3-3), *sur environ 160 élèves* :

Tableau VII.3-3 : indication de la préférence des thèmes abordés pour une partie de la population étudiée

Chimie	Sons	Électricité	Sans préférence	Sans opinion
102 (64%)	19 (12%)	9 (5%)	14 (9%)	16 (10%)

Ce plébiscite pour la chimie ne doit pas masquer la préférence, en physique, pour le son (ce qui va dans le sens des résultats de l'enquête plus large que nous avons mentionnée au chapitre II, § II.3.2.). Il faut aussi mentionner que c'est dans les classes jugées plutôt faible en sciences physiques que le son recueille le plus de suffrage alors que la chimie est quasiment citée seule dans les classes jugées plutôt bonnes dans la discipline. Il ne s'agit ici que d'une tendance à laquelle nous ne donnerons pas plus de valeur qu'elle n'en mérite, mais nous pouvons émettre une hypothèse selon laquelle cette tendance serait le reflet du caractère quotidien de l'objet d'étude, et des aspects qualitatifs et relativement peu formels de l'enseignement de cette partie.

²⁹ Ce dernier jugement est resté assez subjectif puisque réalisé en fonction de la connaissance que nous avons des lycées concernés.

VII.4 Outils d'analyse des questions

VII.4.1 Liens avec les questions phénoménologiques

Pour vérifier que les questionnaires évoquent *a priori* (et du point de vue du chercheur) tous les aspects phénoménologiques mis en débat dans les *questions phénoménologiques* du paragraphe VII.1.4, nous avons repéré pour chacune d'entre elles les questions des questionnaires qui s'y référaient. Cette analyse est bien faite *a priori* et ne préjuge pas du sens que l'élève va donner à la question posée ou du mode de traitement qu'il va adopter. Par exemple, si nous estimons que la question F (interposition d'un mur entre émetteur et récepteur) est liée à la question phénoménologique 3a (influence de la matière sur le son), rien n'indique que l'élève va effectivement donner des indications à ce sujet : il peut par exemple formuler une réponse qui se focalise sur l'influence que le son a sur le mur.

Les résultats de cette analyse sont fournis ci-après (les questions dont nous avons traitées les réponses sont toujours en gras) :

1.
Comment peut-on décrire ce qu'on entend ? **B, F, J, K, T.**
2.
i.
Grâce à quels mécanismes et à quels phénomènes entend-on ? **C, G, H, I, M, N, O, P, Q**
- ii.
Notre perception change-t-elle avec la source sonore ? Quel(s) dépendance(s) et quel(s) mécanisme(s) ? **E, I, K, O, S** 2c : Notre perception change-t-elle dans l'espace ? Quel(s) dépendances(s) et quel(s) mécanisme(s) ? **B, D, L, R, S**
3.
i.
Quelle(s) influence(s) la matière a-t-elle sur le son ? **B, D, F, J, O, P, R**
- ii.
Quelle(s) influence(s) le son a-t-il sur la matière ? **F, P, Q, R**
4.
Quelle est la nature du son ? **G, J, Q**

Cette analyse permet de vérifier que toutes les questions phénoménologiques sont abordées. Nous voyons également que certaines questions des questionnaires concernent *a priori* plusieurs aspects phénoménologiques.

VII.4.2 Aspects du son et cadre conceptuel induits *a priori*

Nous avons expliqué au paragraphe VII.2.2 comment les cadres conceptuels induits par la situation proposée devaient être pris en compte pour pouvoir interpréter les réponses des élèves en terme de cadre conceptuel. Bien plus que le cadre conceptuel utilisé c'est généralement l'écart par rapport au cadre conceptuel induit que nous regarderons et qui sera éventuellement significatif d'une utilisation préférentielle d'un cadre conceptuel alors qu'il n'était pas prévu *a priori* par l'analyse qu'en ferait le savoir à enseigner.

Nous indiquons dans le tableau VII.4-1 quel(s) cadre(s) conceptuel(s) serai(en)t sont *a priori* largement **mis en jeu dans la question, cette analyse étant celle du savoir à enseigner**. Certaines questions nécessitent de pouvoir manipuler ou mettre en relation plusieurs cadres conceptuels, ce qui ne pose généralement pas de problème au physicien mais peut constituer un obstacle important pour l'élève. Par exemple, la question D (concert en plein air) nécessite de prendre en compte le son comme une entité en déplacement (CC2) mais aussi de corréliser ce déplacement avec le fait que la perception baisse en intensité sonore puisque le son est moins fort (CC1). Il y a par ailleurs des questions auxquelles il n'est pas possible de rattacher un ou des cadres conceptuels soit parce que les trois sont à prendre en compte soit parce que la question laisse la possibilité pour répondre d'utiliser l'un ou l'autre (cas de la question G sur le lieu du son).

L'analyse fournit la classification suivante :

Tableau VII.4-1 : cadres conceptuels induits

CC1	aucune question
CC2	C, Q, J, M, P
CC3	I, N, H
CC1 + CC2	B, D, F, R
CC1 + CC3	T, K
CC2 + CC3	E
CC1 + CC2 + CC3	L, S, O
Pas de cadre conceptuel a priori	G

Il est bien évident que certaines questions auxquelles nous avons attribué plusieurs cadres conceptuels mettent davantage en scène l'une des facettes du son. Par exemple si la question B fait intervenir la perception de la sonnerie du téléphone, c'est bien le déplacement du son qui est *a priori* prégnant dans la situation.

Remarquons qu'il n'y a rien d'étonnant à ne pas trouver de questions n'induisant que le cadre conceptuel n°1. Comment, en effet, proposer une situation où il n'y aurait qu'une perception imaginée sans mention aucune d'un autre élément ? Il doit au moins être question d'une cause, ce qui renvoie alors au cadre conceptuel n°3 (c'est en l'occurrence l'objet de la question N).

Le tableau VII.4-2 permet de croiser la référence aux questions phénoménologiques et le cadre conceptuel induit. Ceci permet en particulier de dégager quelques groupes de réponses dont les résultats pourront être mis en regard. Signalons déjà à ce stade :

les questions B, D, F et R, qui induisent toutes la prise en compte des deux cadres conceptuels 1 et 2 (*perception* et *entité hors de la source*) et qui contribuent toutes à mieux comprendre les systèmes explicatifs des élèves au sujet de l'influence de la matière sur le son (3a) ;

les questions H, I et N qui induisent le cadre conceptuel n°3 (*cause de la création*) et ont toutes un rapport avec les mécanismes et phénomènes qui font qu'on entend (2a) ;

les questions S et L qui induisent la prise en compte de toutes les facettes du son regroupées dans les cadres conceptuels (pas forcément dans des proportions égales) et qui mettent en jeu des situations qui questionnent les liens entre perceptions et espace.

Tableau VII.4-2 : croisement entre cadre(s) conceptuel(s) induit(s) et référence aux questions phénoménologiques.

	Questions phénoménologiques						
	1	2			3		4
		2a	2b	2c	3a	3b	
CC1							
CC2	J	C, M, P, Q			J, P	P, Q	J, Q
CC3		H, I, N	I				
CC1 + CC2	B, F			B, D, R	B, D, F, R	F, R	
CC1 + CC3	K, T		K				
CC2 + CC3			E				
CC1 + CC2 + CC3		O	O, S	L, S	O		
Pas de CC induit		G					

Il est important de noter que nous avons effectué cette classification en tenant compte de *l'ensemble* de la question posée (choix multiple *et* explication ou justification). Un bon nombre de ces questions comporte une demande de description puis une demande d'explication. La description et l'explication ne réfèrent pas forcément à la même question phénoménologique, ce qui, si nous séparions les deux aspects, produirait un tableau légèrement différent (qui ferait cependant quelque peu perdre de vue les rapprochements entre questions). Par exemple la question F (influence d'un mur) demande d'abord une description du son perçu (plutôt CC1 et questions phénoménologiques 1 et 2b) puis une explication (plutôt CC2 et questions phénoménologiques 3a, voire 2a).

VII.4.3 Description et explication

Nous proposons ici de classer les questions selon la nature de ce qui est demandé, sans revenir sur les questions épistémologiques abordées au chapitre III au sujet de la distinction entre description et explication.

Nous entendons finalement ici le sens de ces deux termes dans leurs acceptions quotidiennes. Il s'agit de *décrire*, lorsqu'il est demandé une information sur la situation matérielle proposée ou une *prédiction* au sujet des objets, des événements ou des sons perçus. La prédiction ne peut généralement se faire que par description. Il s'agit d'*expliquer*, lorsqu'il est demandé de fournir une justification, ou quelque chose qui s'apparente à une preuve, soit de ce vient d'être décrit soit de ce qui est donné comme un fait dans la question. Le physicien fait généralement fonctionner des savoirs du monde des théories et des modèles pour fournir des explications du monde physique. On sait qu'il n'en va pas toujours de même pour l'élève qui pourra, au titre d'une explication, rester dans le monde des objets et des événements, très proche de la situation matérielle éventuellement fournie.

Mis à part la question A, seule une question ne demande pas d'explication. Sur 19 questions, 9 demandent un renseignement qui s'apparente à une description (même si dans certains cas, c'est une description qui n'implique pas directement les éléments du monde matériel) : B, C, F, K, J, M, O, P, et R. 9 questions sur 19 demandent donc une description puis une explication ou une justification. Nous avons bien évidemment codé les réponses à l'une et à l'autre différemment. Dans certains des cas, la description consistait à répondre à une question à choix multiples.

Nous avons bien conscience ici de la difficulté de description des sons dans un exercice écrit où il est seulement possible d'imaginer les sons. Ceci pose la question plus générale de la capacité de l'élève à se représenter la situation pour porter sur elle un regard "objectif". Pour prédire ou décrire, a-t-il besoin de se projeter dans la situation, d'imaginer qu'il reçoit le signal sonore, ou bien peut-il abstraire le son au point de ne pas avoir besoin d'imaginer la perception ? Nous voyons là aussi que cette différence de comportement peut dans certains cas être révélée par le niveau de savoir adopté (respectivement plutôt au niveau des objets et événements ou plutôt de l'ordre des concepts plus scientifiques).

On peut à ce propos formuler une hypothèse au sujet de la présentation de la situation par un schéma ou un dessin. Est-ce que de tels supports ne favorisent pas l'adoption d'un point de vue objectif où il est alors plus facile de décrire ce que fait le son, comment il est perçu, en permettant finalement de se mettre "à distance" par rapport à la situation ?

VII.4.4 Contexte et familiarité de la situation

Nous avons longuement insisté sur la nécessité de proposer le maximum de situations du monde réel, que les élèves seraient capables de reconnaître comme telles. Nous avons donc cherché, pour les *questions phénoménologiques* que nous nous sommes fixées, des situations les plus familières possibles pour un élève de seconde, sans que la simplicité

de description en pâte. Une autre question, légèrement différente, est celle du contexte proposé. Proposer un contexte matériel (mettant en scène des objets réels et des événements) n'a pas toujours été possible en fonction des objectifs fixés. Par exemple, une question telle que **"Donnez une condition obligatoire pour faire un son"** (N) ne fournit pas de contexte spécifique. Nous précisons dans le tableau VII.4-3 les questions pour lesquelles il existe un contexte matériel (indiqué par un C) et parmi celles-ci, celles qui proposent une situation que nous considérons comme familière pour un élève de début de lycée (ceci est bien sûr une estimation moyenne).

Tableau VII.4-3 : contexte et familiarité de la situation

		contexte	Situation familière
A	<i>"Citez 4 mots que vous associez au son."</i>		
B	"Dans la situation ci-dessous, le téléphone sonne. Les deux personnages entendent-ils le même son ? Expliquez votre réponse."	C	F
C	<i>"Est-ce qu'un son, ça se déplace ? Justifiez en donnant éventuellement un exemple."</i>		
D	Concert en plein air. Explication de "plus on recule, moins on entend fort".	C	F
E	<i>"A votre avis, si un son est émis plus fort qu'un autre, est-ce qu'il va plus vite ?"</i>		
F	Influence d'un mur sur le son perçu	C	
G	Lieu d'existence du son		
H	Cause du son en frappant un verre ou une table.	C	F
I	Cause du son quand on frappe (deux cailloux), frotte (brosse, violon), pince (guitare)	C	F
J	Influence d'une boîte étanche	C	
K	<i>"On frappe avec la même force à deux portes, l'une en bois, l'autre en fer. Comparez les deux sons qu'on entend alors."</i>	C	F
L	Ambulance qui se	C	

		contexte	Situation familière
	rapproche. Explication du son plus aigu.		
M	Comparaison vitesse du son/vitesse de la lumière. Exemple pratique.		
N	<i>"Donnez une condition obligatoire pour faire un son"</i>		
O	Écho: test de plus fort/plus vite /plus long, plus aigu/plus vite /plus long	C	F
P	Milieux de propagation possibles		
Q	Description microscopique		
R	Matériau adapté pour isolation domestique	C	F
S	Localisation de la cause d'un son plus aigu (vibration source ou milieu ?)		
T	Modélisation de la vibration (niveau acoustique, hauteur, timbre).		

Le fait que la situation ne soit pas familière ne signifie pas que les élèves ne peuvent pas comprendre et traiter la situation proposée. Cela signifie juste qu'ils peuvent ne pas avoir déjà eu l'occasion de vivre la situation et de constater les faits décrits. Par exemple nous estimons que la situation d'interposition d'un mur limité entre un chien et un homme n'est pas familière parce que pas forcément vécue auparavant dans ces conditions. Le contexte est cependant un contexte quotidien.

VII.4.5 Liens avec le savoir savant et le savoir à enseigner

Les questions du questionnaire n'ont pas été élaborées pour obtenir des réponses forcément dans les termes de la physique ou avec des explications fournies par la physique. On est ainsi amené à se poser les questions suivantes :

Les questions ont-elles un sens du point de vue de la physique et du point de vue du sens commun ? Par exemple le physicien peut-il répondre d'emblée à toutes ces

questions ou a-t-il besoin d'informations complémentaires pour formuler une réponse qu'il estime être une réponse de la physique ? Les questions pourraient-elles figurer sous cette forme dans un manuel de sciences physiques ?

Est-on obligé de reformuler la question pour qu'elle devienne pertinente et suffisamment claire dans l'un ou l'autre champ (champ quotidien ou champ de la physique) pour pouvoir recevoir une réponse "d'emblée" ?

Pour donner des indications à ce sujet nous indiquons dans l'appartenance à ce que nous pouvons appeler des domaines de pertinence. Nous mettons la lettre Q et la lettre P selon l'appartenance au domaine de pertinence quotidien ou de la physique.

Nous ne justifions pas ici cette classification mais elle est essentiellement issue du chapitre II.

Toutes les questions (sauf la dernière passée uniquement après enseignement) appartiennent au champ quotidien (en tous les cas c'est l'hypothèse que nous faisons). Par contre, 7 questions sont éloignées du champ reconnu par la physique comme son champ d'investigation.

Enfin, nous signalons dans la dernière colonne si la question peut être traitée à l'aide des seuls contenus au programme de la classe de seconde. C'est le cas pour seulement 14 questions sur 20, ce qui permet cependant de prévoir une évolution valorisante pour les élèves. Ceci permet de comprendre cependant l'inquiétude de quelques enseignants au sujet des progrès de leur élèves sur ces quelques questions.

Tableau VII.4-4 : domaines de pertinence et lien avec le savoir à enseigner (questions traitées en gras)

			Rapport au savoir à enseigner				Rapport au savoir à enseigner
A	Q	P		K	Q		
B	Q			L	Q	P	
C	Q	P		M	Q	P	
D	Q	P		N	Q	P	
E	Q	P		O	Q	P	
F	Q			P	Q	P	
G	Q			Q	Q	P	
H	Q	P		R	Q		
I	Q			S	Q	P	
J	Q			T		P	

VII.5 Élaboration et utilisation des grilles d'analyse

VII.5.1 Élaboration

Pour pouvoir effectuer un traitement quantitatif et statistique des réponses ouvertes, il est indispensable d'utiliser des grilles d'analyse et de codage. Chaque production en langage naturel ou éventuellement schématique est ainsi codée à l'aide d'une grille spécifique à chaque question. Nous détaillons ici le processus d'élaboration de ces grilles et les éléments pris en compte.

Notre ligne directrice a ainsi été celle d'un équilibre entre la possibilité de regroupement des catégories de codage pour dégager de grandes tendances dans les réponses et la dégradation minimale de l'information contenue dans les réponses.

Garder le maximum d'information impose d'établir une grille précise (ce qui en facilite d'ailleurs la transmissibilité), à petit grain d'analyse. Cependant, notre approche impose de dégager des grandes tendances de conceptualisations, qui dépassent si possible le niveau de la situation unique. Il convenait alors de regrouper ces catégories *a priori* lors de l'établissement de la grille, et *a posteriori* lors de l'analyse des résultats.

Nous avons donc dû élaborer une grille par question (les grilles sont fournies en annexe). Ceci a été le seul moyen de préserver le maximum des informations contenues dans les productions des élèves, souvent très contextuelles. Coder une réponse, c'est inévitablement juger cette réponse et perdre de façon quasi inévitable une partie de l'information (sauf si la réponse correspond exactement à telle ou telle catégorie). Nous devons alors élaborer des grilles qui dépassaient le jugement subjectif (le "jugement" doit être sans équivoque et déboucher sur une catégorie unique quel que soit le codeur) en perdant cependant le minimum d'information.

Nous avons pu illustrer dans les paragraphes précédents l'importance que nous attribuons aux cadres conceptuels. Ils sont la trame principale commune aux grilles. Les codes d'analyse sont ainsi toutes regroupées par cadre conceptuel ou par combinaisons de cadres conceptuels. Ceci est illustré par le texte ci-dessous qui donne les codes d'analyse des réponses à la question N ("**Donnez une condition pour faire un son**").

	1.
Pas d'informations	
	i.
pas de réponse	
	ii.
"je ne sais pas"	
	iii.
paraphrase	
	iv.
réponse inexploitable	
	2.
Perception (cadre conceptuel 1)	

- i. il faut entendre quelque chose, il faut une personne pour entendre, un tympan...
- ii. paraphrase du type "il faut qu'il y ait du bruit"
- 3. condition "milieu matériel", évoquant le trajet du son (cadre conceptuel 2)
 - i. nécessité d'un milieu
 - a. avoir de l'air
 - b. avoir un gaz
 - c. un milieu matériel, un milieu de propagation, autre chose que du vide
 - ii. vibration(s) du (dans) milieu (ou mouvement, déplacement du milieu)
 - iii. ondes (hors source)
 - iv. il faut qu'il y ait propagation (en tant que phénomène nécessaire) dans air ou milieu
 - v. point de vue micro
 - a. il faut des particules ou des molécules
 - b. il faut des particules (ou mol.) en vibration ou en mouvement
- 4. condition sur "source" (cadre conceptuel 3)
 - i. deux objets (ou un seul)
 - a. en interaction de contact
 - b. en interaction à distance
 - c. en mouvement

sans préciser	d.
un émetteur	ii.
une voix	a.
précis (type haut-parleur, instrument)	b.
en général (ou source) ou « émetteur » sans préciser	c.
un mouvement	iii.
une vibration (privilégiée p/r à mouvement si les deux sont cités)	iv.
des vibrations	v.
caisse de résonance ou mécanisme amplificateur	vi.
fournir de l'énergie	vii.
condition combinée	5.
vibration(s) + milieu de propagation	i.
un émetteur + un récepteur	ii.
un émetteur + un milieu de propagation	iii.
un milieu de propagation + un récepteur	iv.
un émetteur + un milieu de propagation + et un récepteur	v.
autre	6.
Il n'y a pas de condition	i.

- il faut un bruit ii.
- autre iii.

Nous avons donc, avec de telles grilles, la possibilité de coder bien plus que les cadres conceptuels qui émergent des réponses. Ce seul codage aurait rendu l'analyse unidimensionnelle et dégraderait énormément l'information. Nous avons par contre la possibilité de voir assez rapidement, une fois les réponses codées, si un cadre conceptuel prédomine (tous les codes commenceraient par exemple par 3 dans l'exemple ci-dessus).

Ce regroupement *a priori* par cadre conceptuel n'empêche en rien les analyses sur un autre plan, en opérant des regroupements *a posteriori* entre différents codes. Ceci est permis par la finesse d'analyse que nous avons choisie. En prenant toujours la même question pour illustrer notre propos, nous pouvons ici regrouper tous les codes qui évoquent la notion de vibration (en l'occurrence 2.2, 2.5.2, 3.4, 3.5, et 4.1). Pour permettre ces regroupements, il convenait de disposer d'un nombre suffisant de catégories, résultat de l'équilibre entre finesse d'analyse et temps nécessaire pour coder (le temps de codage augmente avec le nombre de catégories).

Les grilles ont été finalisées par de nombreux tests. Une petite centaine de questionnaires a permis de mettre au point ces grilles en vérifiant deux points essentiels :

la grille élaborée est capable de coder la quasi-totalité des réponses (la catégorie "autre" devant rester très marginale) ;

la catégorie doit pouvoir être choisie sans vraiment d'hésitation, en prenant soin de choisir celle qui dégrade le moins l'information.

Un échantillon de l'ordre de la centaine a semblé suffisant pour permettre une élaboration définitive des grilles.

VII.5.2 Critères de codage et utilisation

Les grilles élaborées permettent donc de coder normalement de façon objective. La finesse du grain d'analyse rend cependant parfois le codage relativement long. Malgré cette finesse, certaines productions d'élèves peuvent encore concerner, dans certains cas, plusieurs catégories d'analyse. Il est possible dans certains cas que deux (ou plusieurs) idées soient mentionnées. Dans ces conditions nous effectuons les choix selon la hiérarchie suivante³⁰ :

La catégorie qui est *a priori* (i.e. du point de vue du chercheur) la plus pertinente par

³⁰ Certaines questions possèdent des critères spécifiques quant aux priorités à accorder (voir annexes).

rapport à la question posée (si par exemple le son est décrit alors que ce n'est pas du tout demandé, ni codé, on laisse cette information de côté).

La catégorie qui semble la plus sûre si on peut le percevoir.

La catégorie qui correspond bien à l'un des cadres conceptuels étudiés si une des idées répond effectivement à ce critère.

La catégorie qui apparaît la première si aucun des critères ci-dessus n'a suffi.

Les idées incompréhensibles ou trop peu claires (pour des raisons d'écriture ou de formulation) sont codées comme telles.

Les réponses qui ne fournissent pas d'informations sont codées précisément mais seront souvent regroupées sous le terme "absence d'information". Cette catégorie regroupe les réponses "je ne sais pas", les absences de réponses et les strictes paraphrases.

Pour valider l'utilisation et la fonctionnalité de ces grilles, des codages en parallèle par deux chercheurs différents (qui connaissent bien la grille et les consignes ci-dessus) ont été effectués sur trois classes (environ cent élèves) avant et après enseignement. Les écarts relatifs entre les deux codages sont dans tous les cas inférieurs à 5%, la plupart étant dus à des compréhensions différentes du libellé de certaines catégories. Pour peu qu'elles soient assez précisément expliquées, ces grilles semblent donc tout à fait transmissibles et utilisables par une personne qui ne les a pas élaborées.

Chapitre VIII Présentation des questions et résultats

VIII.1 Présentation des questions et résultats spécifiques

Nous choisissons ici de présenter les questions en respectant l'ordre dans lequel elles sont présentées dans le questionnaire (et donc l'ordre de réponse des élèves si les consignes ont été respectées). Des connexions entre questions pourront être faites au fur et à mesure mais la synthèse du paragraphe VIII.2 aura exclusivement pour fonction de mettre en lien les résultats de questions différentes afin de dégager des grandes tendances. Nous nous livrons donc ici davantage à une analyse précise et locale, question par question, alors que le paragraphe VIII.2 exposera une analyse globale.

D'autre part, bien que l'étude lexicale soit l'objet du chapitre suivant, nous présentons question par question les évolutions lexicales concernant les termes de la liste L ³¹.

³¹ Rappel des termes de la liste L (sauf son): volume, intensité, fréquence, vibrer (ou vibration), émettre (ou émetteur ou émission), recevoir (ou récepteur ou réception), se propager (ou propagation), résonner (ou résonance), aigu, grave.

L'utilisation de ces termes est en effet fortement contrainte par la situation et il nous paraît logique de la présenter à la suite des autres résultats, qui pourront de fait expliquer tel ou tel aspect des résultats lexicaux pour la question considérée. Bien qu'il fasse partie de la liste, nous avons exclu le terme "son" du repérage des utilisations dans les questions parce que souvent cité dans l'énoncé lui-même. Son utilisation dans les réponses ne semblait pas, dans ces conditions, révéler quoi que ce soit de pertinent.

Enfin, nous commençons cette analyse par la deuxième question du questionnaire dans la mesure où la première concerne exclusivement des usages lexicaux. Elle aura donc davantage sa place dans le chapitre suivant qui sera consacré à ce point de vue.

VIII.1.1 Question B

VIII.1.1.1 Énoncé

Dans la situation ci-dessous le téléphone sonne.
Les deux personnages entendent-ils le même son ? Oui ou Non ? Si non, pourquoi ?
Écrivez votre réponse :



VIII.1.1.2 Présentation

Cette question est à lier à la transparence du milieu (Casati & Dokic, 1994). Le contexte est ici celui d'une situation de perception. Il invite le sujet à objectiver la situation en tenant compte des paramètres pertinents pour lui, paramètres qu'il devra expliciter dans la justification fournie. L'élève peut pour ceci se projeter dans la situation des personnages ou imaginer un mouvement de recul. En la decontextualisant, la question générale posée ici est donc la suivante : la position par rapport à la source influence-t-elle toujours le son perçu ? Si tel est le cas, en quoi ? Cette question s'intéresse donc bien au rapport entre perception et configuration spatiale, en mettant en jeu un contexte familier et une situation qui peut également paraître familière. Le téléphone a été choisi en tant que source pour la constance (dans le temps) et la simplicité qui peut être attribué au son qu'il émet. Nous rendons ainsi constante la variable "source" dans la situation.

Si le contexte est familier, cette situation sort par contre du champ empirique classique du savoir à enseigner de seconde. La première raison en est que les sons du type de celui du téléphone ne sont pas étudiés en tant que tels (le téléphone n'est pas une source traditionnellement étudiée ou utilisée en classe). La deuxième raison est que la distance entre les deux personnages, qui peut paraître suffisamment importante pour percevoir une différence ou trop petite pour ne plus entendre le téléphone, laisse une place importante à la subjectivité perceptive, ce qui est généralement évité dans les situations d'enseignement. Il est ainsi possible de répondre que les personnages entendent le même son en pensant que la distance qui les sépare est trop faible pour que la différence de perception soit sensible. Il est également possible de penser que la perception sonore est une expérience tellement individuelle et subjective que deux

personnages entendront toujours deux sons différents, même issus d'une même source ou encore d'évoquer la dispersion ou le rayonnement du son.

Cependant, le savoir à enseigner de seconde caractérise tout son par sa hauteur, son niveau acoustique et son timbre. La baisse du niveau acoustique (invoqué par beaucoup comme on va le voir, mais pas avec ce type de formulation) devrait dans ce cadre suffire à conclure à la différence des deux sons perçus. Si tel n'est pas le cas, c'est que, pour celui qui répond et dans cette situation, ce qui caractérise le son perçu n'est pas cela. Les paramètres qui caractérisent ce qu'est un son pourraient donc dépendre de la situation. Le son dans la vie quotidienne ne serait pas caractériser de la même façon que le son étudié en classe de physique.

Finalement, ce n'est pas tant la case cochée qui est intéressante ici que la justification fournie.

Il est intéressant de voir ici dans quel cadre conceptuel les élèves répondent. En effet, si du point de vue de la physique on doit ici s'intéresser au son en dehors de la source (CC2), il faut faire le lien entre le déplacement du son et la perception sonore (CC1). Il est pertinent d'observer si les élèves éprouvent le besoin de justifier dans le cadre CC2 ou s'ils restent dans un cadre explicatif purement perceptif. Enfin, ceux qui lient exclusivement son et objet émetteur seront aussi identifiés (cadre conceptuel 3).

Il convient également d'observer si les réponses sont faites en terme de modèle et/ou de concepts abstraits ou bien avec des éléments très liés à la situation.

VIII.1.1.3 Résultats essentiels

Des avis stables sur l'identité des deux sons Le diagramme VIII11 met en évidence le peu d'évolution dans le jugement sur l'identité des deux sons perçus (case cochée). 33% des élèves avant enseignement et 30% après répondent que les deux personnages perçoivent le même son. Quasiment tous les élèves ont un avis sur la question (très peu de non réponses). On retiendra donc cette proportion d'un tiers des élèves qui estiment que le son entendu est le même, proportion sur laquelle l'enseignement n'a pas d'effet significatif. Reste à savoir comment est justifiée cette identité (voir plus loin).

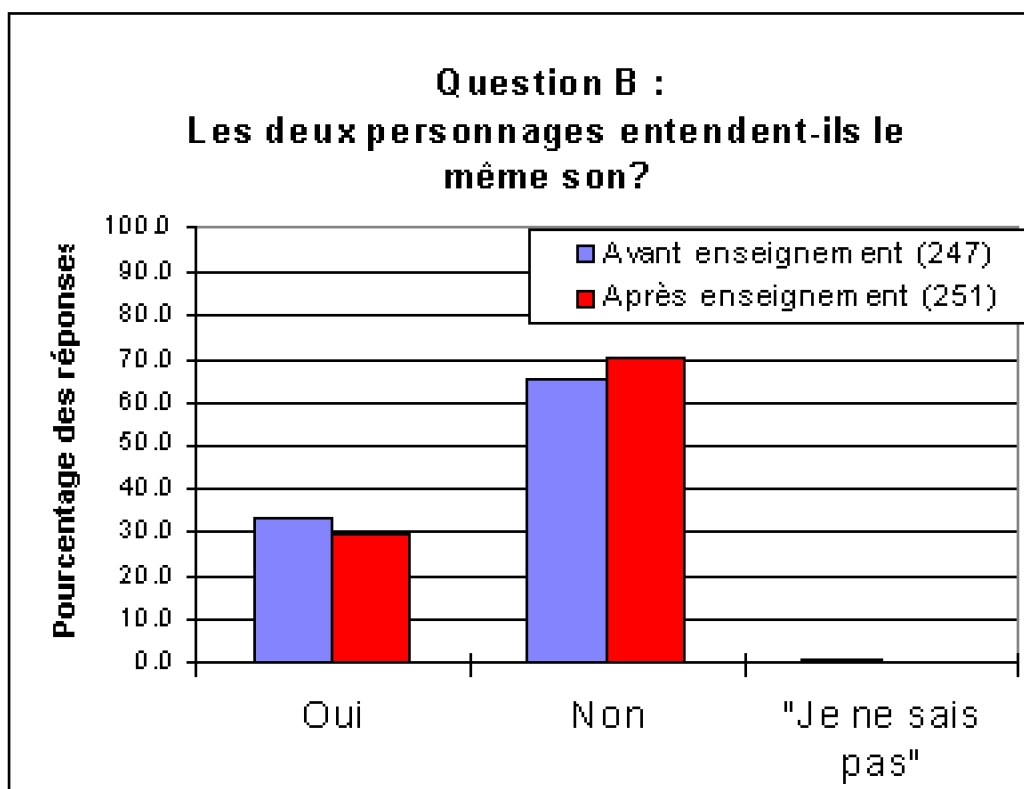


diagramme VIII11 : question B, résultats du choix multiple

Fort taux de réponses Le taux de réponse concernant l'explication est très élevé en comparaison à d'autres questions (2% seulement avant et après).

Répartition selon les cadres conceptuels On constate une légère évolution des élèves qui répondent uniquement en terme de perception (de 14% avant à 20% après) ainsi qu'une très légère évolution de ceux qui invoquent un déplacement du son ou au moins une position différente des deux auditeurs (de 69% avant à 73 % après) alors que les élèves dont la justification n'évoque que la source sont moins nombreux (10% avant à 3% après). Cette seule invocation de la perception, pour environ un cinquième des élèves peut paraître important au regard du recours à la distance et à l'espace que la physique effectue pour une telle situation. Nous tentons d'interpréter ceci ci-dessous.

Un recours important à la sensation perceptive La description des sons n'étaient pas explicitement demandée. Pourtant environ la moitié des réponses (49% avant et après) fait appel à la perception, que celle-ci soit reliée à la distance entre les deux personnages ou non (12% du total des réponses avant enseignement indiquent juste que le son est moins fort pour l'un des personnages, 19% après). Cette importance de la description qui fait donc souvent office de justification permet d'estimer que les élèves

n'éprouvent pas le besoin d'approfondir la justification, ou tout au moins qu'il est difficile de justifier pour eux en d'autres termes que ceux du champ expérimental. On peut tenter d'expliquer ceci de trois façons différentes :

—
le caractère d'évidence attribué à l'analyse de cette situation. Le document iconographique fourni comme support à cette question permet en effet de se dispenser d'évoquer la distance entre les deux personnages puisque c'est quasiment la seule information repérable sur le schéma. Nul besoin alors d'explicitier cette cause implicite qu'est la distance ;

—
la familiarité de la situation. Ce point peut être lié ou non au précédent dans la mesure où cette familiarité peut s'exprimer dans le recours à une situation plus quotidienne et évidente (ou déjà vécue) mais reconnue comme similaire à celle qui est proposée. Les élèves sont probablement ici mis face à un fait brut (Guillaud, 1998), qui n'est pas reconnu comme un fait scientifique et qui par suite n'appelle pas une interprétation en termes scientifiques. Une description suffit à "expliquer" la situation qui n'en nécessite pas forcément aux yeux des élèves ;

—
le besoin de justifier en invoquant la différence de position peut ne pas être ressenti pour expliquer la différence des deux sons : il peut suffire par exemple d'expliquer *en quoi* ils sont différents. En ce sens, l'enseignement peut favoriser l'argument perceptif seul (si c'est moins fort pour l'un, les deux sons ne sont pas les mêmes) puisqu'il caractérise un son entre autre par son caractère fort / faible.

Le même son, mais plus fort. Cet aspect important du savoir à enseigner (le caractère fort / faible comme facteur définissant un son) aurait pu expliquer la progression de 12 à 19% des réponses du type "c'est moins fort pour le deuxième personnage". Pourtant, lorsque l'on regarde de plus près ce que pensent de l'identité des deux sons ceux qui ont répondu ainsi, on a la surprise de constater qu'ils répondent en majorité qu'on entend *le même son*. On peut même observer (diagramme VIII.1-2) que plus de la moitié (54% avant, 58% après) de ceux ayant répondu que les deux personnages entendent le même son évoquent une différence de perception du type "plus ou moins fort" (ou différence de propriété physique influençant le niveau sonore).

répartition des justifications pour les élèves ayant répondu "même son" (avant N=82, après N=75)

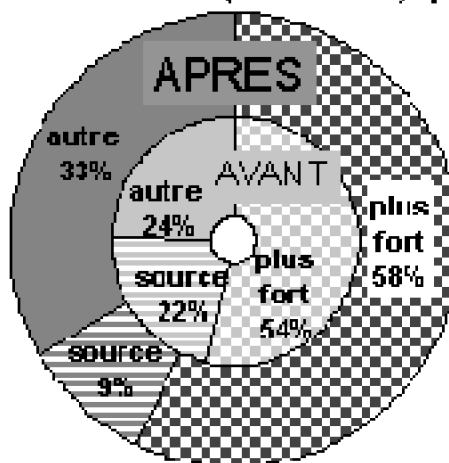


diagramme VIII.1-2: question B, illustration de l'idée "même son, mais plus fort"

On voit donc ici le décalage qui peut exister entre l'importance que le savoir à enseigner accorde au caractère fort / faible comme élément de définition (ou au moins de caractérisation) d'un son et l'aspect secondaire que revêt ce même caractère pour les élèves lorsqu'il s'agit de juger de l'égalité de deux sons.

Évolution du recours aux grandeurs physiques. On constate (ce sera également le cas pour la question D) une augmentation des réponses en terme de changement des paramètres physiques. Comme nous l'avons dit au paragraphe VII.2.3., ceux-ci peuvent être vus comme des propriétés du son mais de nature très différente de celles désignées par un adjectif descriptif. Ces paramètres physiques sont par exemple *amplitude*, *intensité*, *puissance*, *force*, *niveau sonore* ou encore *fréquence*, *vitesse*... En regroupant toutes les réponses en terme de paramètres physiques du son (conséquence ou non d'un déplacement du son par exemple) on passe de 10 à 23%. Les élèves font davantage appel à des concepts qu'ils peuvent juger scientifiques parce qu'introduits par l'enseignement pour argumenter leur réponse après enseignement.

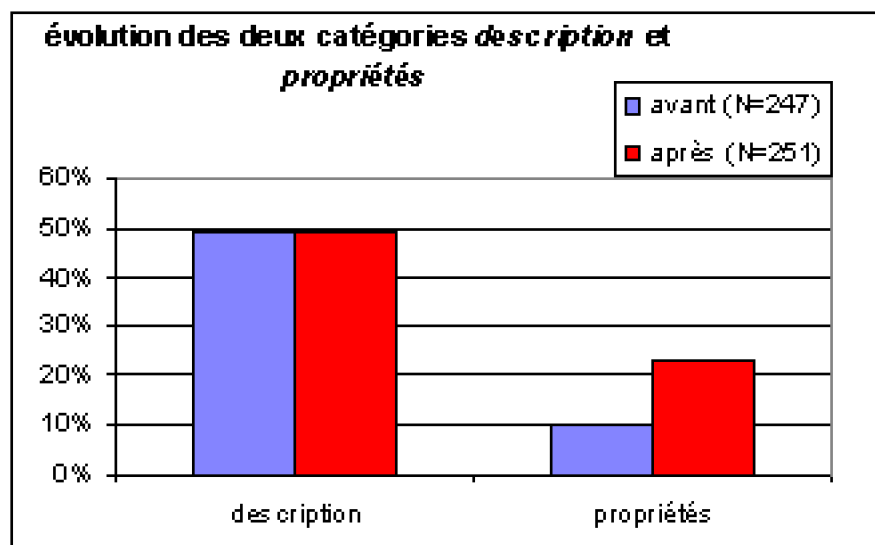


diagramme VIII.1-3 : question B, réponses en terme de description ou de propriétés

Rappelons par ailleurs que la proportion d'élèves se livrant à une description du son du type "plus fort, plus faible" seule ou accompagnée d'un lien avec la distance reste constante. Pour la question D, cette proportion est en légère baisse, ce qui pourra s'expliquer par le fait que la description de la perception est alors fournie, ce qui n'est pas le cas ici.

Décalage temporel Signalons aussi un petit nombre d'élèves qui évoquent un décalage temporel entre la perception des sons. Ces réponses sont en légère augmentation (4% avant, 7% après). Il semble ici que la prégnance des situations d'enseignement dans lesquelles on étudie la vitesse du son, ou les *temps de vol* intervient chez ces quelques élèves pour une situation qui ne faisant pas *a priori* appel à des considérations temporelles.

Une faible importance attribuée à la source Enfin, il est intéressant de noter que les élèves s'appuyant dans leur réponse sur la nature de la source sont peu nombreux (10% avant enseignement, 3% après). Ceci correspond au cadre conceptuel 3, qui est donc peu utilisé. La quasi totalité de ces élèves indiquent que les deux personnages entendent le même son. Dans ce cadre, le son semble défini par l'objet qui l'émet (ou par un concept qui serait proche de la "sonorité" ou du "timbre"). Nous pouvons voir dans la diminution du nombre de ces réponses l'effet d'un enseignement qui étudie le son comme une entité ayant des propriétés propres qui conditionnent la perception bien plus que comme un concept attaché à un émetteur. Nous aurions pu croire en tous les cas à une importance plus grande de l'objet émetteur, en particulier avant enseignement.

VIII.1.1.4 Comparaison SOC / non SOC

On ne note pas de différence significative entre les sous-groupes.

VIII.1.1.5 Évolution lexicale

Avant enseignement seuls 10% des élèves utilisent un des mots de la liste L (24 élèves dont 4 redoublants). Ils sont par contre 26% à le faire après (65 élèves). Nous observons donc une nette évolution mais nous retiendrons surtout la très faible utilisation générale des termes choisis pour répondre à cette question, ce qui contribue à montrer que les concepts physiques ont été peu utilisés (les deux seuls descripteurs *aigu* et *grave* n'étant pas pertinents ici, ils ne sont pas utilisés). Même le terme *volume*, qui pouvait paraître approprié ici est très peu utilisé avant enseignement (3 citations sur 24), beaucoup plus après (13 fois). Le terme *intensité* est cité dans la moitié des cas avant.

Les termes émergeant après enseignement sont *se propager / propagation* (12 occurrences), *volume* (13) mais surtout *fréquence* (16), pour une situation où ce concept n'est *a priori* pas forcément pertinent. Un concept tel que *vibration* n'est pas appelé pour cette situation (2 occurrences).

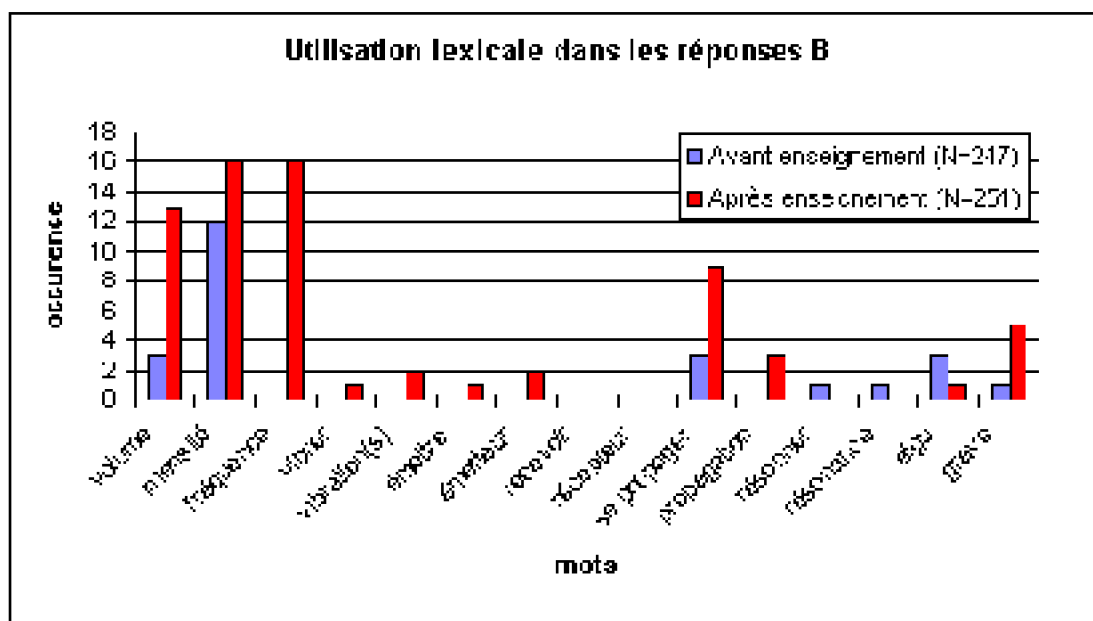


diagramme VIII.1-4 : question B, évolution lexicale

Enfin, le peu d'occurrence de l'ensemble des mots étudiés empêche de faire des comparaisons significatives entre les deux populations SOC et non-SOC. Nous noterons juste, comme confirmation de ce qui est vu par ailleurs (voir en particulier questions A et T) une nette différence quant à l'utilisation de *fréquence* (12 citations pour SOC, 4 pour l'autre groupe).

VIII 1.2 Question C

VIII.1.2.1 Énoncé

Est-ce qu'un son, ça se déplace ?

oui

non

je ne sais pas

Justifiez en donnant éventuellement un exemple.

VIII.1.2.2 Présentation

Cette question n'est posée qu'avant enseignement. Ceci est justifié par le fait que le savoir à enseigner insiste énormément sur le déplacement du son. Le concept de vitesse est d'ailleurs quasiment le seul qui va pouvoir donner lieu à des calculs au cours de cette partie de cours. Il paraissait donc inintéressant de poser la question du déplacement du son après enseignement, dans la mesure où la réponse aurait acquis un caractère évident. Par contre, on peut regretter de ne pas pouvoir comparer les niveaux de réponses des justifications qui auraient été fournies après cet enseignement.

Les justifications du déplacement vont donner une idée du niveau de conceptualisation utilisé pour argumenter. Les réponses peuvent en effet faire appel soit à un modèle, soit à une situation (plus ou moins canonique), soit encore à une nuance sémantique sur le verbe "déplacer". La formulation de la question n'indique aucun contexte particulier. Nous allons pouvoir alors étudier d'une part si la recontextualisation semble nécessaire (ce qui est proposé par la demande d'un exemple) et si elle a lieu facilement, d'autre part quelle type de recontextualisation est fournie dans ce cas.

L'activité qui consiste à illustrer du général par du particulier (et spécialement lorsque le "général" paraît théorique et le "particulier" plus concret ou commun) n'est pas *a priori* une activité très facile pour les élèves de début de lycée.

La question invite évidemment à répondre en terme de trajet du son (cadre conceptuel 2). De ce fait, les réponses qui ne font appel qu'à la réception auditive ou à la source ont encore plus d'intérêt puisqu'elles indiqueraient la prégnance de ces points de vue avant enseignement.

VIII.1.2.3 Résultats essentiels

Un phénomène connu Le diagramme VIII.1-5 indique que 83% des élèves affirment que le son se déplace, 7% pensent le contraire (en fait un quart d'entre eux, soit 5 élèves, réfutent le terme "déplacer" sans réfuter l'idée de propagation du son) et 10% ne savent pas.

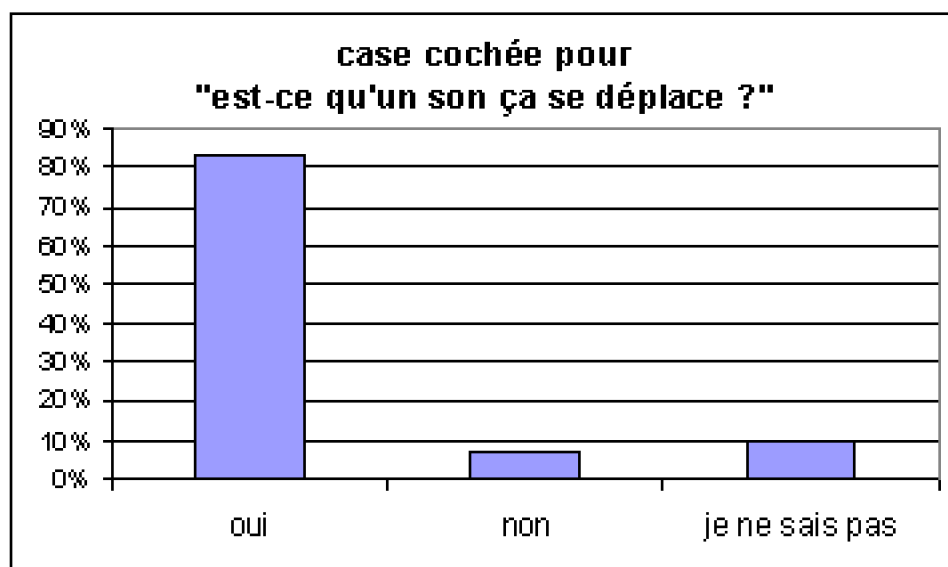


diagramme VIII.1-5: question C, résultats du choix multiple

Nous pouvons donc estimer que le déplacement du son est largement connu avant enseignement même s'il faut tempérer ce résultat par un effet de formulation de la question qui incite à répondre en ce sens, en particulier du fait de la demande d'un exemple illustrant la réponse. On notera quand même qu'il reste presque 20% des élèves pour lesquels le déplacement du son n'est pas acquis, dont la moitié n'a pas d'avis. Le contenu d'enseignement de seconde insiste énormément sur le déplacement du son et ses propriétés et propose pour l'illustrer (voir le "prouver") des activités qui peuvent prendre du temps. Il n'est pas rare par exemple d'y consacrer au moins un TP (détermination de la vitesse par mesure d'un temps de vol ou par mesure de "temps d'écho" comme il est mentionné dans les commentaires du programme) et de s'intéresser aux premières mesures historiques de la vitesse du son (ce qui est également mentionné dans les commentaires du programme). Ce qui constitue une des connaissances essentielles de seconde est finalement une évidence pour quasiment tout le monde. Il y a donc là un certain décalage entre l'importance que la propagation du son occupe dans le contenu de seconde et la connaissance finalement assez largement partagée des élèves avant enseignement. Par contre c'est dans la capacité à interpréter ce déplacement quelque peu délaissée, comme on l'a vu au chapitre II, par les textes officiels que l'enseignement peut trouver sa justification, puisque la difficulté à apporter des preuves va se révéler manifeste.

Une justification difficile Une proportion de 19% des 247 élèves ne donne pas de justification ce qui est un des taux les plus élevés sur l'ensemble des questions. Les élèves semblent donc relativement démunis pour justifier le déplacement du son.

Des justifications en terme d'objets et d'événements En fait les élèves sont relativement démunis pour justifier le déplacement du son surtout lorsqu'il s'agit de le faire à l'aide d'autre chose qu'une situation particulière, plus ou moins quotidienne pour eux.

L'essentiel des justifications (au moins les trois quarts d'entre elles) se fait en terme de description des objets et des événements. La contextualisation semble donc être un moyen pratique de justifier l'affirmation fournie, quelle qu'elle soit. La situation ou l'exemple donnés sont souvent mis au service d'une idée plus générale (qui relève davantage d'un modèle) comme le rayonnement ou la diffusion du son dans l'espace disponible, la réflexion des sons... Le passage d'un problème non contextualisé à une situation particulière ne semble donc pas poser trop de problème. Ceci peut se comprendre par le fait qu'on invitait à donner éventuellement un exemple, mais ce résultat laisse quand même penser que les élèves manquent d'outils conceptuels d'interprétation sur ce type de situations. Les élèves qui ne fournissent pas d'exemple (environ un quart de ceux qui justifient) ne répondent pas pour autant toujours à l'aide de concepts de la physique ou de raisonnements complexes. En effet 10% des justifications sont constituées d'arguments de type encyclopédique sur le déplacement même ou sur l'existence de la vitesse du son mais ne dénotent pas une utilisation d'un raisonnement en termes de concepts scientifiques. On peut citer par exemple :

—

L10230 ***"la vitesse du mur du son"***

—

L11119 ***"je n'ai pas de d'exemple, je le sais c'est tout."***

—

L10206 ***"j'ai souvent entendu dire que le son se déplaçait mieux dans l'eau que dans l'air" (c'est lui qui souligne)"***

—

L10216 ***"lorsqu'on parle de vitesse du son, c'est qu'il se déplace"***

—

L04112 ***"sinon on ne parlerai pas de vitesse du son : le mur du son"***

—

L04115 ***"le son a une vitesse de déplacement"***

—

L13111 ***"je crois qu'il se déplace à 3000m/s"***

De plus, 8% des justifications consistent en une précision de la proposition de l'énoncé, en précisant soit ce qui se déplace (*onde*, *vibration*) soit le verbe d'action (*se propager* au lieu de *se déplacer* par exemple). Si l'utilisation de ces termes permet de donner un "habillage" scientifique à la question, elle n'indique rien de précis sur la compréhension effective de ces termes.

Des réponses très diverses Le point précédent explique partiellement la diversité globale des justifications. Celle-ci est telle qu'il est difficile de dégager des groupes de réponses qui dépassent 25%.

Le son existe en dehors de la source Dans la mesure où la quasi-totalité des élèves

indiquent que le son se déplace, il n'y a rien d'étonnant à ce que les réponses soient formulées dans le cadre conceptuel 2 (pas forcément seul cependant) : c'est le cas de 83% des justifications (166 sur 199). Nous comptons ici toutes les réponses qui évoquent explicitement la vitesse ou le déplacement du son ou d'une entité liée au son.

Un peu plus d'un tiers (36%, codes 24 et 28, voir annexes) des justifications invoque l'existence du son en dehors de la source, qu'il y ait un récepteur ou non. Une bonne partie d'entre eux se réfère d'ailleurs à la situation précédente de la question B (téléphone et deux personnages). Une petite partie (6% du total) évoque un son qui se répand ou qui se diffuse. Notons cependant que ceux qui répondent uniquement que si le son ne se déplaçait pas on ne pourrait pas entendre (4%) font implicitement appel à l'existence du son en dehors de la source même s'ils ne le mentionnent pas. Concernant les deux autres cadres conceptuels que nous avons envisagés *a priori*, comme il était à prévoir, les pourcentages sont bien moins importants : 7,5% des justifications (13) peuvent être reliées au cadre conceptuel "perception" et 2,5% (5) au cadre conceptuel "cause-source".

L'écho ou le rebond : événement pertinent 19 % (codes 221 et 27, voir annexes) éprouvent le besoin de parler d'écho ou de rebond du son pour justifier le déplacement.

Décalage temporel peu cité En plus des réponses où l'écho est cité, 7% des justifications (222 et 232, voir annexes) évoquent un décalage temporel entre émission et réception ou entre deux réceptions. Cette proportion est faible. Ceci pose question vis-à-vis du savoir à enseigner qui puise énormément dans ces situations d'une part pour mettre en évidence le déplacement du son mais aussi pour effectuer des mesure de la vitesse du son. Le contraste est extrêmement fort entre ce qui a été enseigné et ce qui est utilisé pour justifier le déplacement du son. En fait, les savoirs de type encyclopédique ("**la vitesse du son existe**", "**la vitesse du son vaut...**", "**je sais que ça se déplace...**") font, comme on l'a vu, plus souvent foi de justification (10 %).

Reformulation Enfin, comme nous l'avons déjà dit, 6% des élèves (8% de ceux qui justifient) répondent en jouant sur la formulation de la proposition. Ce sont ceux qui remettent en cause le terme "déplacer" au profit le plus souvent de *propager* ou qui substituent *vibration* ou *ondes* à *son*. Sur les 15 élèves concernés, il n'est pas étonnant d'en trouver 6 qui redoublent. Citons les exemples suivants pour illustrer ce type de réponses:

—

L10231 : **il ne se déplace pas, il se propage**

—

L07305 **"oui, car un son c'est la vibration de l'air donc elle se déplace"**

—

L10203 **"un son est comme une onde il se déplace"**

—

L10215 **"un son émet des ondes qui se déplacent, par exemple un klaxon"**

Une grande partie des résultats mentionnés ci-dessus sont résumés dans le diagramme ci-dessous.

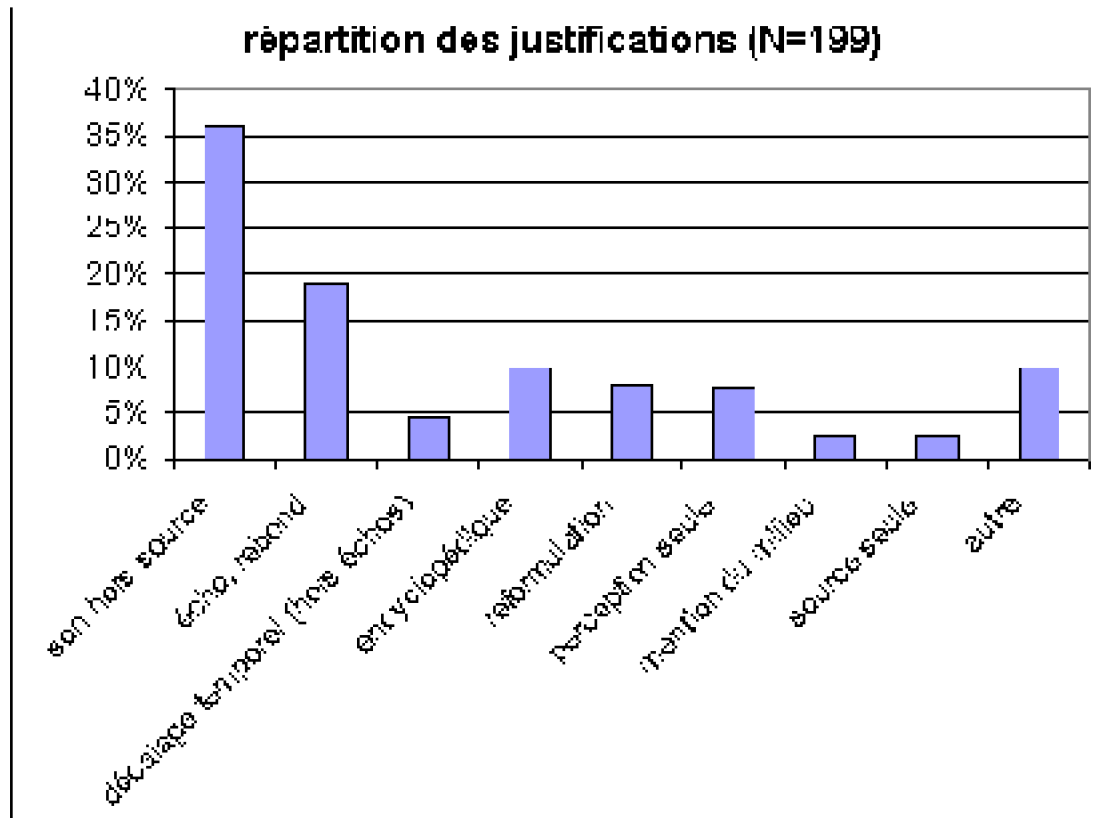


diagramme VIII.1-6 : question C, résumé des résultats

Exemples cités Un codage à part (autre que celui qui code les justifications) permet d'explorer les exemples cités quand nous pouvons les repérer clairement. Les cinq exemples attendus et codés étaient :

- i.
orage, décalage entre éclair et tonnerre...
- ii.
écho
- iii.
feux d'artifice ou *coup de canon*, de façon générale situation pour laquelle il y a un décalage entre ce qu'on voit au niveau de la source et la perception du son.
- iv.
avion ou *mur du son*
- v.
instrument de communication par ondes électromagnétiques (exemple : L13107)

"Quand une chaîne de radio émet un son, il va bien du lieu où se trouve la chaîne de radio à chez nous")

Ces exemples ne sont cités que dans un tiers (32%) des justifications, ce qui laisse à penser que même si l'essentiel des justifications reste au niveau des objets et des événements, ce ne sont pas sur ces exemples qui peuvent pourtant paraître prototypiques que les élèves s'appuient. Modérons ce propos en rappelant qu'un nombre non négligeable (environ un quart) de justifications ne fournissent pas d'exemples quotidiens. Sur ce tiers, 62% citent l'écho, puis viennent l'avion (16%), la communication par un moyen électromagnétique (13%), et l'orage / éclair (9,5%). Notons bien ici que nous n'avons pas indiqué si les exemples étaient utilisés à bon escient et exploités convenablement. L'exemple "avion" est assez caractéristique de ceci puisque cet objet est vaguement associé à la vitesse du son souvent parce qu'on connaît l'existence du mur du son franchissable par les avions. L'exemple est également cité avec des explications très variées ou floues, ou sans être expliqué du tout. Ainsi tout se passe comme si l'objet "avion" ou l'objet "mur du son" étaient associés de façon prototypique à la vitesse du son sans en connaître davantage sur les mécanismes (complexes) en jeu. Enfin Nous pouvons mentionner quelques situations citées comme exemple, issues généralement du vécu des élèves et souvent réduites à la mise en situation d'un émetteur et d'un récepteur particuliers :

·
L10226 ***"à la télé, une personne en direct a un décalage au niveau du son et de ses lèvres"***

·
L10225 ***"Dans les ordinateurs le son part de la carte son puis sort par les haut-parleurs"***

·
L6324 ***"le son se déplace en même temps qu'une voiture par exemple"***

·
L10233 ***"la membrane d'une baffe vibre, d'où l'effet d'un mouvement"***

·
L10210 ***"S'il y a de la musique dans une chambre, quand on est de l'autre côté de la porte, on entend le son"***

·
L13101 ***"Lorsque j'entends qqun marcher alors qu'il n'est pas tout près de moi, le son a bien dû arriver jusqu'à moi"***

·
L13115 ***"quand un oiseau se déplace en volant et en émettant un bruit en même temps"***

VIII.1.2.4 Usage linguistique

Il n'y a que 11% d'élèves à utiliser dans leur réponse un des mots de la liste *L*. On mesure ici le décalage entre les éléments de réponse à ce type de question avant enseignement et le lexique du savoir à enseigné. 5,5% (du total des élèves) utilisent *se propager* ou *propagation* (plus de la moitié sont des redoublants).

VIII.1.3 Question D

VIII.1.3.1 Énoncé

Lorsqu'on est à un concert en plein air (dans un grand champ par exemple, sans mur autour), plus on recule, moins on entend fort. Essayez d'expliquer pourquoi.

VIII.1.3.2 Présentation

Cette question est liée à la question B dans la mesure où elle s'intéresse également aux liens phénoménologiques existant entre perception et espace. La question D ne s'intéresse elle qu'à *l'interprétation* de la décroissance de niveau sonore lorsqu'on s'éloigne de la source. Une situation (le concert) la plus épurée possible mais cependant crédible est proposée. Par rapport à la question B, la description de la perception est cette fois donnée (on entend moins fort) et on demande de l'expliquer. L'emploi de l'article "on" permet d'une part de faciliter l'identification afin de vivre l'expérience, d'autre part de fournir à cette expérience de pensée un caractère universel (c'est toujours vrai quel que soit l'individu impliqué).

La source sonore est également différente de celle de la question B. On a maintenant une situation dans laquelle le son est *a priori* complexe (au sens du langage courant puisque le son musical en question n'est pas précisé), pas vraiment défini, changeant, ne pouvant pas facilement être attaché à un objet source précis.

Enfin, la précision d'un espace libre et dégagé, nécessaire pour permettre l'étude de l'effet de la propagation seule (et pas des réflexions ou réverbérations) sur le son, peut induire ou orienter les explications vers des causalités géométriques (le son peut se "dispenser", "se répandre", "il n'y a plus d'échos, plus de murs pour renvoyer le son"...).

Le contexte est donc ici un contexte quotidien (le concert) même si les concerts en plein air ne sont pas les plus courant probablement rencontrés par les élèves (mais ils savent que ça existe) et on peut considérer que la situation est familière dans la mesure où la connaissance de la décroissance du son lors d'un recul est présente chez les élèves, que la situation présentée ait été réellement vécue ou que ce soit une autre situation qui permette de connaître ce fait.

Le cadre conceptuel induit ici est le cadre conceptuel "Trajet, phénomènes hors source" (CC2), éventuellement mélangé au cadre conceptuel considérant le son comme quelque chose de perçu (CC3) puisqu'il faut tenir compte ici de l'évolution de la perception. Cette question est favorable pour discriminer les sous-cadres conceptuels "déplacement d'un point à un autre" (CC2a) et "rayonnement, dispersion" (CC2b).

Du point de vue de la physique, rappelons que la cause de la diminution de niveau sonore est double :

d'une part, dans le cas d'une onde sphérique ou cylindrique, l'énergie par unité de surface diminue car au fur et à mesure de la propagation, l'énergie est répartie sur une surface de plus en plus grande. En champ ouvert, comme c'est le cas ici, et dans l'air cet effet est largement prédominant ;

d'autre part, l'air dissipe l'énergie sonore. Il y a donc un amortissement dû au milieu.

Pour la physique, les cadres conceptuels "déplacement" (CC2a) et "rayonnement" (CC2b) peuvent donc être opératoires pour interpréter une même situation.

Il est important de remarquer que le programme de seconde n'évoque pas ces causes. Il est seulement fait mention dans celui-ci d'"expériences sur les ultrasons mettant en évidence l'absorption". Cependant, une analyse rapide des ouvrages scolaires peut laisser penser qu'un certain nombre d'enseignants traitent au moins du premier point (en particulier pour justifier le fait, au programme, que l'unité de la puissance sonore est le $W.m^{-2}$).

VIII.1.3.3 Résultats essentiels

Taux de non réponses Un peu plus d'un élève sur 10 ne répond pas ou ne sait pas répondre que ce soit avant ou après enseignement (12,9% avant, 11,2% après). Comparé à ce que nous constatons pour d'autres questions, l'effet de l'enseignement semble donc extrêmement faible sur ce taux de non-réponse. Ceci laisse à penser que la situation proposée n'est pas reconnue comme une situation traitée dans le cadre de l'enseignement. Le transfert entre ce qui a été appris et cette situation a peut-être plus de mal à se faire que pour d'autres questions. La diversité des réponses (et des catégories d'analyse) rend assez difficile l'émergence de grandes catégories d'interprétation. On peut cependant à la lecture attentive des résultats dégager une analyse du point de vue des deux critères ci-dessous.

Descriptions en terme de perception ou en terme de propriété physique du son (ou de la vibration associée) Sans s'occuper dans un premier temps de la façon dont le comportement spatial du son est décrit, il apparaît que les élèves restent au niveau de la description de l'aspect perceptif du son (se contentant de "moins fort", "moins net", "moins bien", "moins clair"....) ou passent à un niveau de modélisation qui implique une description en terme de propriété physique du son ou de la vibration associée ou encore de l'onde...(par exemple *amplitude*, *intensité*, *puissance*, *tonalité*, *volume* ou encore *fréquence*). La première catégorie correspond aux codes 211, 221 et 10 de la grille, la deuxième aux codes 212, 222 (le code 225 nécessite l'évocation de la surface sur laquelle se répartit le son mais les réponses font ensuite appel soit à des concepts physiques soit à des descripteurs perceptifs). Si environ un quart (24%) des réponses évoquent une description (ou une évolution) du son en termes perceptifs avant enseignement, cette proportion tombe à 17,5% après enseignement (diagramme

VIII.1-7). On constate donc une légère chute alors que dans le même temps on observe une augmentation très nette des descriptions en terme de propriétés physiques (de 16% à 30%). Cette baisse des réponses en terme de perception n'est pas constaté pour la question B, pour laquelle l'évolution de la perception n'était pas donnée et pouvait constituer effectivement une justification.

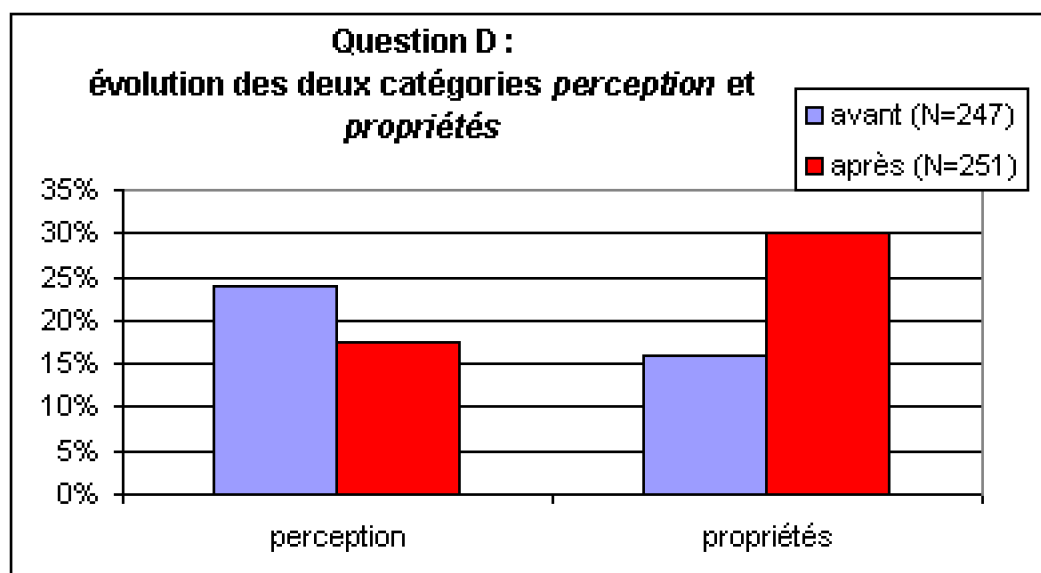


diagramme VIII.1-7 : question D, évolution des descriptions en termes de perception ou en termes de propriétés

Si l'on regarde de plus près l'évolution des avis à ce sujet nous constatons (diagramme VIII.1-7 à gauche) que seulement un quart de ceux qui parlaient en terme de descripteurs perceptifs avant continuent de le faire après (15 élèves). Un autre quart passe à des descriptions en terme de propriétés, les autres ne redécrivant pas le son après enseignement.

Les 39 élèves qui parlent en terme de propriétés avant ne sont qu'à peine la moitié à continuer de le faire après (18 élèves). Très peu (4) décrivent la perception sonore après enseignement. Sur les 75 élèves qui sont dans cette catégorie (*propriété*) après enseignement, seuls 19% étaient dans l'autre catégorie avant (diagramme VIII.1-8 à droite).

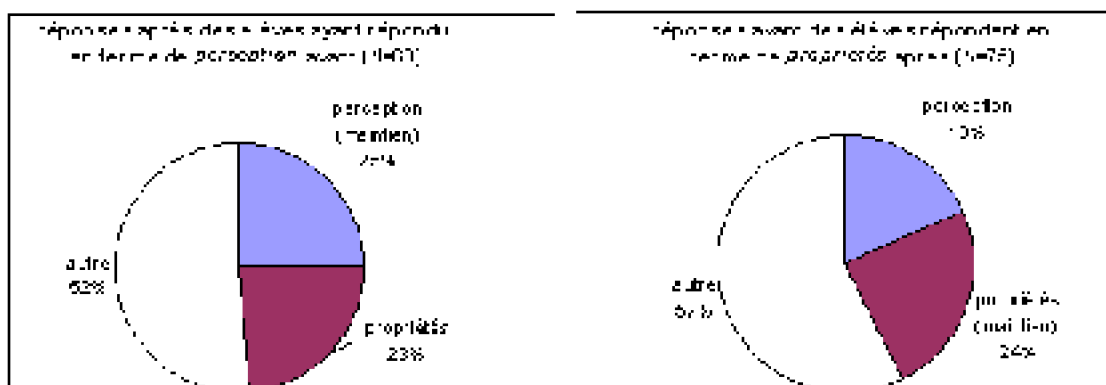


diagramme VIII.1-8: question D, suivi individuel des évolutions de réponses en termes de description ou de propriété

Nous retiendrons donc surtout l'évolution significative de la population globale concernant ces deux catégories et on restera prudent sur une interprétation en terme d'évolution individuelle, même si elle existe.

Les concepts physiques permettant la description des sons prennent le pas, après enseignement, sur les descriptions en terme de perception auditive. L'enseignement semble donc induire une conceptualisation des descriptions de l'objet son. Les concepts (et leur évolution) deviennent des outils plus utilisés pour interpréter les situations.

Remarque : les proportions assez élevées des réponses "autre" dans les diagrammes précédents sont dues à la diversité des réponses. Dans le premier diagramme on trouve en particulier 8 élèves (13%) qui ne fournissent plus d'informations après enseignement et 8 qui disent que le son n'est plus enfermé, qu'il n'y a plus d'écho ou de résonance. Dans le second diagramme (57% de "autre"), 19 élèves (25%) invoquent avant enseignement un son pas enfermé ou l'absence d'échos et 5 (7%) indiquent avant enseignement que la distance est trop grande ou que le son ne peut pas nous atteindre.

Différence SOC / non SOC sur ce sujet

La tendance mise en évidence ci-dessus semble être accentuée pour la population SOC. En effet, pour ceux-ci, le groupe "perception" passe de 26 à 12% et le groupe "propriétés" de 14% à 36 %. Respectivement, pour l'autre population, on n'a aucune évolution pour perception et une augmentation de 7% (de 17% à 24% pour une interprétation en terme de propriétés). Les résultats (en occurrences) sont regroupés dans le tableau VIII.1-2 ci-dessous.

Tableau VIII.1-2 : comparaison de l'évolution des deux populations au sujet de la description en termes de perception ou de propriétés

	SOC		Non SOC	
	Avant (N=118)	Après (N=121)	Avant (N=129)	Après (N=130)
Perception	31 (26%)	15 (12%)	29 (22%)	29 (22%)
propriétés	17 (14%)	43 (36%)	22 (17%)	32 (25%)

Il semblerait donc que le contenu d'enseignement proposé par le groupe SOC renforce effectivement chez les élèves l'importance donnée aux concepts en jeu et leur utilisation pour des situations non forcément rencontrées au cours de l'enseignement.

Trajet ou rayonnement La catégorie qui est la plus importante en nombre (25%) avant enseignement est celle qui évoque un son non enfermé, sans obstacle, dans un espace où il n'y pas de résonance (code 224, voir annexes). Celle qui devient la plus importante (25% également) après enseignement est celle qui déduit d'un déplacement du son (d'un endroit à un autre) l'évolution d'une de ses propriétés (code 212, voir annexes). Ces deux catégories sont révélatrices du croisement dynamique plus large qui s'opère entre un point de vue qui voit le son en déplacement sur un trajet (appelé à partir

d'ici "déplacement") et un point de vue qui voit le son en expansion rayonnante, un son se répandant dans l'espace disponible, qui se disperse ou se diffuse (appelé à partir d'ici "rayonnement", même si le terme est très rarement utilisé par les élèves). Ces deux points de vue sont bien décrits par les deux cadres conceptuels CC2a et CC2b. On a ainsi regroupé toutes les catégories impliquées dans ces deux cadres et on obtient les résultats suivants :

	AVANT (N=247)	APRES (N=251)
Déplacement	46 (17%)	81 (32%)
Rayonnement	114 (46%)	76 (30%)

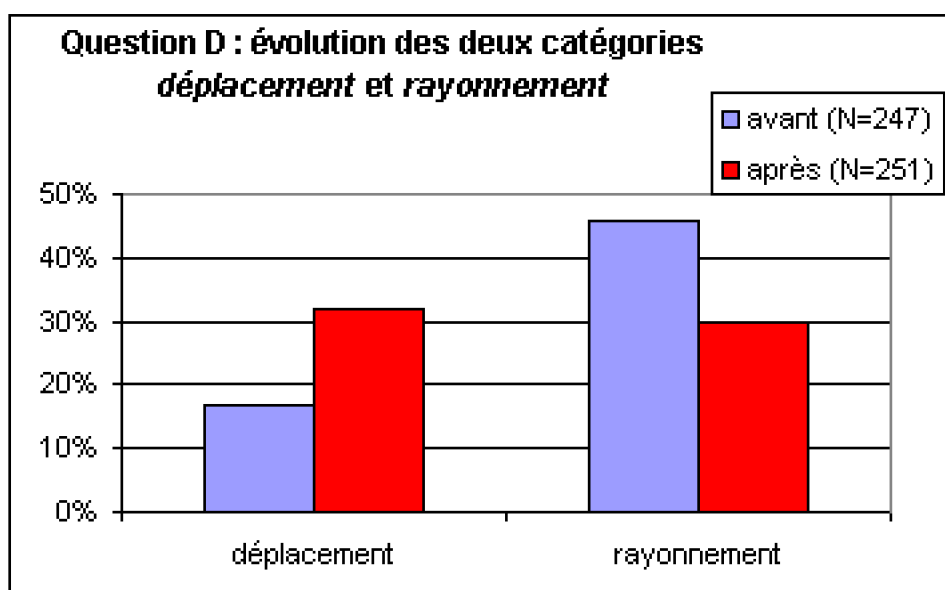


diagramme VIII.1-9 : question D, évolution des interprétations en terme de déplacement ou de rayonnement

On observe donc une diminution de *rayonnement* au profit de *déplacement*. Tout se passe comme si le raisonnement en terme de rayonnement, *a priori* pertinent ici et utilisé par près de la moitié des élèves avant enseignement était inhibé par le contenu d'enseignement qui met l'accent, il est vrai, sur le déplacement du son, la mesure de la vitesse, le temps de vol, la position respective de l'émetteur et du récepteur (pour étudier le trajet).

Il reste à voir si ce transfert global concerne les mêmes individus. En fait, 30% (34) de ceux qui ont répondu en terme de rayonnement avant changent de point de vue après et 38% (43) restent dans le même cadre. Les 34 élèves qui passent de *rayonnement* à *déplacement* représentent donc 42% du total des 81 après enseignement (et un quart des 81 avaient déjà répondu ceci avant enseignement).

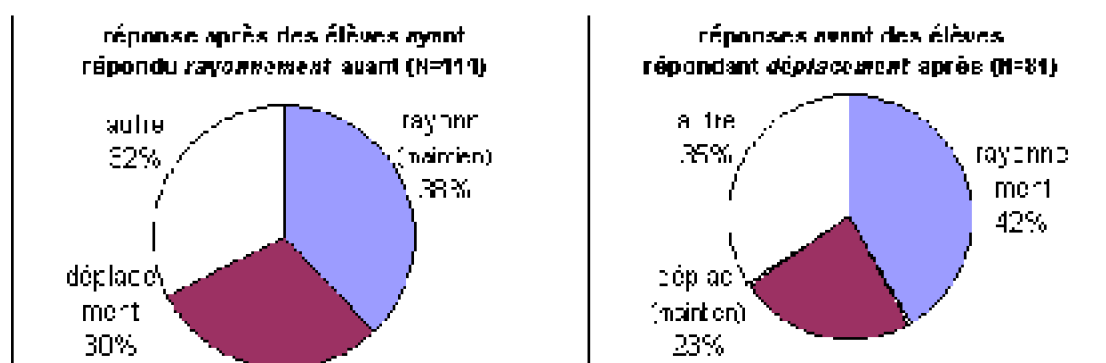


diagramme VIII.1-10 : suivi individuel de l'évolution des interprétations en termes de déplacement ou de rayonnement

On peut donc légitimement estimer qu'il y a bien passage, en grande partie individuel, du cadre conceptuel CC2b vers le cadre conceptuel CC2a.

Comparaison SOC / non SOC sur ce sujet

Même si on peut percevoir un effet légèrement accentué pour la population SOC, les différences ne semblent pas très significatives, ce qui n'est pas surprenant dans la mesure où SOC ne propose aucun enseignement spécifique et original sur ce sujet.

Tableau VIII.1-3 : comparaison de l'évolution des deux populations au sujet des interprétations en termes de déplacement ou de rayonnement

	SOC		non SOC	
	Avant (N=118)	Après (N=121)	Avant (N=129)	Après (N=130)
Déplacement	20 (17%)	41 (34%)	26 (20%)	40 (31%)
rayonnement	62 (53%)	39 (32%)	52 (40%)	37 (28%)

VIII.1.4 Question E

VIII.1.4.1 Énoncé

A votre avis, si un son est émis plus fort qu'un autre, est-ce qu'il va plus vite ?

- oui
- non
- je ne sais pas

Justifiez.

VIII.1.4.2 Présentation

La question E n'est posée qu'après enseignement. Elle nécessite en effet de considérer connu le fait qu'un son se déplace, ce dont nous n'étions pas sûr pour ce qui concerne les connaissances avant enseignement. Les résultats obtenus (en particulier la question C) nous ont en fait indiqué que même avant enseignement environ 80% des élèves sont capables de mettre en oeuvre cette connaissance. Comme une confirmation supplémentaire, des questions contextualisées comme les questions B (téléphone) et D (concert en plein air) nous indiquent que c'est une connaissance largement partagée avant enseignement. Ainsi, la question aurait pu être raisonnablement posée avant enseignement mais nous n'avions pas les moyens de le savoir, d'autant que les tests préalables à l'élaboration du questionnaire avaient mis en évidence quelques réponses indiquant une relative difficulté à admettre que le son se déplace. Par excès de prudence nous n'avons donc pas posé la question avant enseignement.

La question est ici de savoir si la vitesse du son est corrélée au caractère plus ou moins fort du son. Nous savons en effet (cf. chapitre III) que l'association "plus fort - plus vite" est une conception largement répandue avant tout enseignement sur le son et qu'elle perdure dans certains cas même après un enseignement sur le sujet. C'est une conception qu'il est possible de relier aux conceptions rencontrées en mécanique liant par exemple force d'un jet et vitesse de l'objet. Le transfert aux situations sonores conduit alors à affirmer que plus on crie fort, plus le son créé va vite.

Pour étudier l'existence de cette conception après enseignement, on propose à l'élève une situation qui n'est pas vraiment contextualisée, puisque le contexte d'émission du son n'est pas donné. La question est cependant formulée en termes d'objets et événements (son *plus fort*, on demande s'il *va plus vite*). On impose ici d'imaginer la perception en supposant qu'un son est émis plus fort qu'un autre. Comme nous l'avons déjà mentionné, ceci génère inévitablement un écart par rapport à la situation de perception réelle dans laquelle l'élève pourrait se trouver.

L'étude de cette question vise bien davantage que l'observation de la conception "*plus fort, plus vite*" puisque celle-ci ne pourra être repérée qu'avec une partie de la réponse seulement, celle qui concerne le choix multiple (*oui, non, je ne sais pas*).

La justification va pouvoir apporter bien d'autres renseignements. En particulier il est intéressant de savoir si la justification fait appel à des concepts de la physique ou uniquement à des situations concrètes. Le savoir à enseigner permet en effet de répondre à cette question en affirmant (et en l'illustrant éventuellement par une expérience de cours) que la vitesse de propagation ne dépend que du milieu de propagation, sans dépendre de l'amplitude du son, paramètre qui détermine le caractère plus ou moins fort du son. Il sera d'ailleurs intéressant d'observer si la connaissance première énoncée à ce sujet ("la vitesse ne dépend que du milieu") va être fournie comme telle ou bien utilisée pour argumenter vis-à-vis de la situation proposée, ce qui implique un processus cognitif plus complexe.

Quoi qu'il en soit, l'enseignement permet ici des raisonnements en termes de propriétés physiques et de concepts pour interpréter la situation.

Du point de vue de l'analyse des réponses en terme de cadre conceptuel, si le cadre conceptuel 2 peut naturellement être fortement attendu, on peut aussi penser que le

l'aspect "source" va être utilisé. C'est même l'articulation entre ces deux aspects qui est nécessaire pour répondre complètement à la question. De plus, n'oublions pas que la caractéristique unique du son émis ("plus fort") est donnée *via* un descripteur *perceptif*. Ainsi, c'est l'aspect "perception", davantage que "cause-source", qui peut être mis en avant. Les liens vont-ils être faits entre source et vitesse ou entre perception et vitesse ?

VIII.1.4.3 Résultats essentiels

Un fort taux de bonnes réponses Parmi les 251 élèves qui répondent à cette question, 13% ne savent pas si le son va plus vite ou ne répondent pas, et ils ne sont qu'un peu plus de 12% à affirmer que le son va plus vite. Ainsi les trois quarts des élèves affirment que le son ne va pas plus vite, ce qui peut paraître peu dans la mesure où le contenu d'enseignement insiste normalement sur l'indépendance de la vitesse avec l'amplitude et la fréquence d'un son. Ce pourcentage est similaire à ceux trouvés dans d'autres conditions sur le même sujet (en particulier Maurines (1998) donne 21% après enseignement de l'ancien programme de 1^{ère} sur les ondes). D'autres études semblent indiquer de façon logique que le pourcentage est un peu plus fort avant enseignement (Maurines annonce 40%, Varaine et Treillard (1998) une proportion de l'ordre de 35%).

Un taux de justification de 80% Si nous occultons les élèves n'ayant pas coché de case ou ayant répondu "je ne sais pas", il reste 219 élèves s'étant prononcés. Parmi ceux-là, seuls 178 (81%) justifient leur réponse (on ne compte pas dans ces 178 les 8 élèves qui paraphrasent complètement l'énoncé de la question). Sans qu'on puisse vraiment en connaître les raisons, il y a donc, en comparaison d'autres questions, une difficulté à justifier la case choisie. Cette absence de justification est en proportion légèrement supérieure chez les élèves pensant que le son va plus vite (32%) que chez ceux pensant qu'il ne va pas plus vite (17%).

Un quart des élèves seulement évoquent l'indépendance entre la vitesse et une propriété physique du son. Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, une des questions importantes que nous nous posons porte sur la capacité à justifier la réponse choisie en terme de paramètres, de concepts physiques, ce que nous avons finalement regroupé au chapitre précédent sous le terme "propriétés" (*fréquence, amplitude, intensité, volume, puissance, niveau acoustique, niveau sonore*). Comme nous l'avons dit par ailleurs ces notions sont partagées entre les concepts correspondants de la physique ou les concepts de la vie quotidienne. En aucun cas on ne considère dans cette catégorie les adjectifs qui permettent de décrire une perception (*fort, faible, aigu, grave, long, court...*). On considère donc logiquement que le force du son, du fait de la proximité lexicale du terme "fort" n'est pas une propriété du son. On observe un peu moins d'un quart des élèves qui invoquent explicitement l'indépendance de la vitesse et d'une de ces propriétés, ce qui est bien inférieur au pourcentage qu'obtient Maurines au sujet de l'explicitation des "*liens entre amplitude sonore et vitesse de propagation*" (1998, p.3)³². On peut raisonnablement penser que ceci est permis par l'enseignement

suivi dans la mesure où le lien entre ces termes et le son ne sont même pas effectués avant enseignement (voir plus loin les résultats de la question A). L'enseignement permet donc bien les raisonnements en termes de propriétés physiques et le recours à ces concepts pour interpréter la présente situation. Il paraît de plus raisonnable d'ajouter à ces 23% les 7% qui ne font que préciser qu'il n'y a *que* telle ou telle propriété qui change quand on crie plus fort (sous-entendu pas la vitesse). Ceci renforce la tendance dégagée ci-dessus. Ces résultats, ainsi que les suivants, sont mentionnés dans le diagramme VIII.1-11:

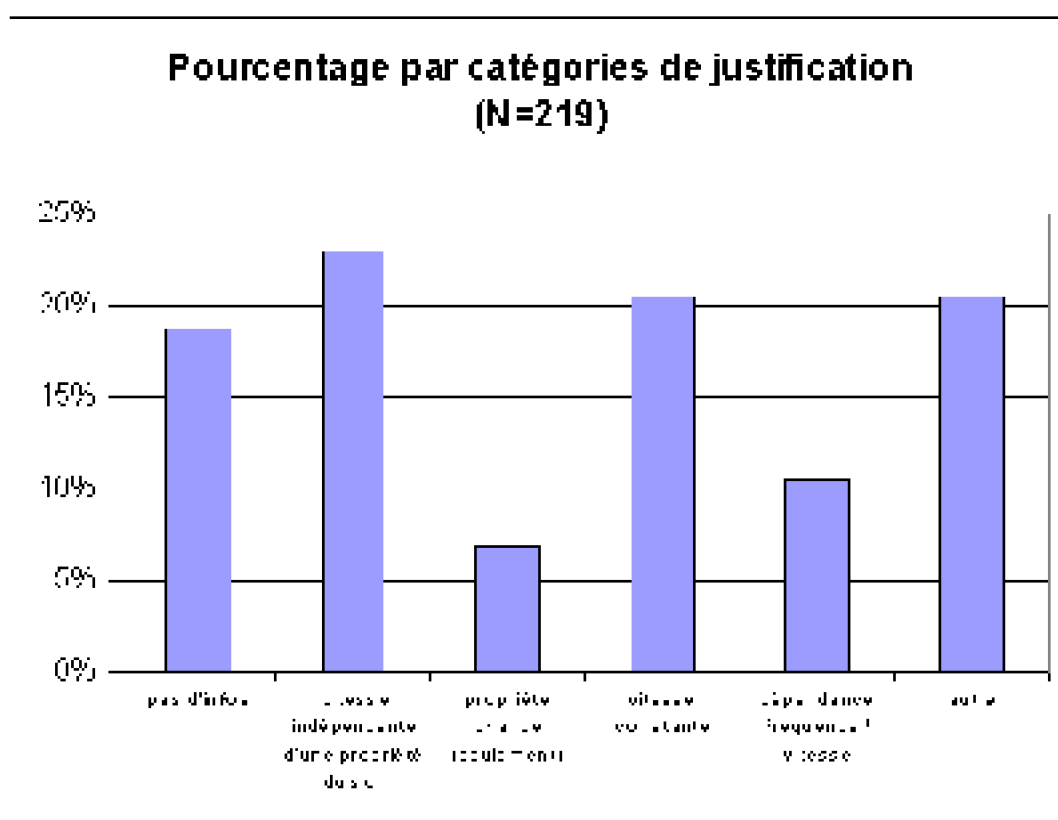


diagramme VIII.1-11 : question E, types de justification

La vitesse est constante Environ un cinquième des élèves (21%) donnant une

³² Il semble bien cependant que dans ce dernier cas, la reformulation de l'explicitation soit faite par le chercheur, les productions des élèves restant bien davantage au niveau des descripteurs perceptifs.

explication ne s'intéressent pas au fait qu'un des sons émis est supposé plus fort. Ils utilisent un argument d'autorité, en accord avec un des points fondamentaux du savoir à enseigner, qui présente la vitesse du son comme une constante du milieu. Quelques nuances cependant. Sur les 45 élèves concernés, 10 précisent que la vitesse est constante *dans l'air* et 16 qu'elle est constante *dans un milieu donné*. On retrouve là l'importance donnée par la physique au milieu comme facteur déterminant la vitesse de propagation du son.

Importance du milieu Pour continuer sur ce dernier point, il est intéressant de décompter toutes les réponses qui évoquent le milieu de propagation. On regroupe donc les trois réponses-types suivantes :

- la vitesse est constante dans l'air la vitesse est constante dans un milieu donné
- la vitesse (ne) dépend (que) du milieu

On atteint alors 19% des justifications, ce qui là encore est important dans la mesure où la situation n'évoquait en rien le milieu de propagation.

Dépendance fréquence – vitesse Même si c'est plus anecdotique, il est intéressant de remarquer que 9% des justifications mettent en relation fréquence et vitesse. Certains points de vue explicitent même une relation entre la fréquence et la vitesse de vibration, confondue alors avec la vitesse du son. On peut s'étonner de voir ici invoquer la fréquence alors que la physique n'incite pas à le faire pour cette situation. Il est cependant possible de voir cette tendance comme un moyen d'utiliser le concept de fréquence, qui, comme on le verra par ailleurs (questions A, T), est un concept émergeant de façon significative après enseignement. Les élèves de la population SOC sont deux fois plus nombreux à produire ce type de justification que les autres élèves (16 au lieu de 7), ce qui va dans le sens de la tendance plus générale que nous mettrons en évidence plus loin.

Taux de "bonnes réponses" du point de vue de la physique A partir de ces résultats, on peut se livrer à un comptage des justifications fausses et justes du point de vue de la physique. On obtient le résultat suivant sur 201 justifications :

- - fausses : 31 (15,5%)
- - justes : 159 (79%)
- - indéterminées (réponses inexploitable ou incompréhensibles du point de vue de la physique) : 11 (5,5%).

Les réponses sont donc globalement justes. Parmi celles-ci, mentionnons 6 énoncés *a priori* hors sujet du point de vue de la physique : il s'agit des réponses évoquant la fréquence ou la durée (avec mention ou non de l'indépendance de ces paramètres et de la vitesse).

Remarquons enfin que l'essentiel des réponses se font bien dans le cadre conceptuel 2, peut-être même plus, du fait de l'importance donnée à la constance de la vitesse, que ce que nous aurions pu prévoir (les deux autres cadres conceptuels sont assez peu utilisés).

VIII.1.4.4 Comparaison SOC / non SOC

Les résultats (regroupés sur le diagramme VIII.1-12) sont pour cette question analysés avec des précautions supplémentaires qui tiennent au fait que nous n'avons pas les productions des populations avant enseignement. Nous ne retiendrons donc que les tendances très flagrantes, peu nombreuses.

La population non-SOC donne moins de justifications (un quart ne fournit pas de réponse contre un peu plus de 10% pour la population SOC) : soit cette population trouve cette question trop évidente (ce qui est relativement surprenant pour une situation pas si courante) soit cette population est légèrement plus démunie, ce que nous retiendrons ici.

L'invocation de concepts de la physique (dans des réponses autres que l'indépendance fréquence-vitesse) est plus importante pour les élèves n'ayant pas suivi la progression SOC (36% contre 22%).

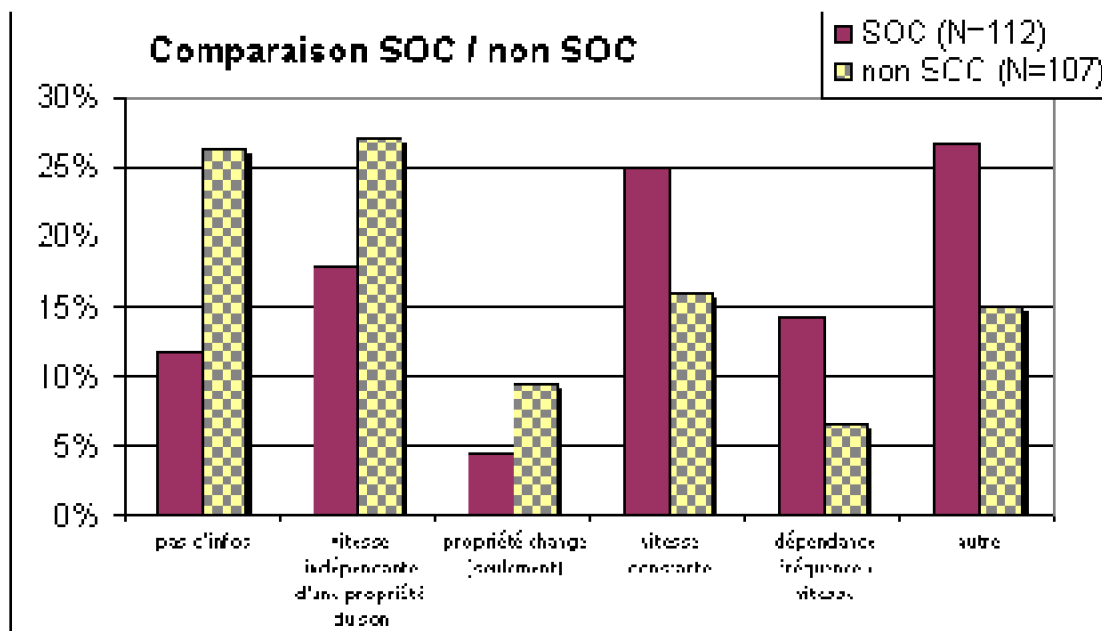


diagramme VIII.1-12 : question E, comparaison des justifications selon la population

VIII.1.4.5 Analyse lexicale

Les résultats au sujet de l'emploi lexical dans les justifications fournies sont regroupés dans le diagramme VIII.1-13. Il y a au moins un mot de la liste L dans 45% des justifications fournies (3/5 par les élèves des classes SOC).

C'est évidemment les termes *se propager* et *propagation* qui constituent une bonne partie des citations (36%). Ces termes permettent en effet de rendre le propos que les élèves peuvent tenir sur la vitesse du son plus scientifique ou tout au moins plus en accord avec le savoir à enseigner qui évite le terme *déplacement* ou profit de *propagation*. On peut ensuite signaler *intensité* (23%) qui permet de reformuler en terme plus conceptuel le fait qu'on émet un son plus fort, *volume* (9%) qui peut assurer une fonction similaire, et *fréquence* (21%) dont on a déjà parlé auparavant.

A part *intensité*, ces termes sont plus souvent cités par la population des classes SOC.

En effet si la population non SOC cite *intensité* dans la moitié des cas, l'autre population cite plutôt *fréquence* et *propagation*, ce dernier terme lui étant quasi exclusif.

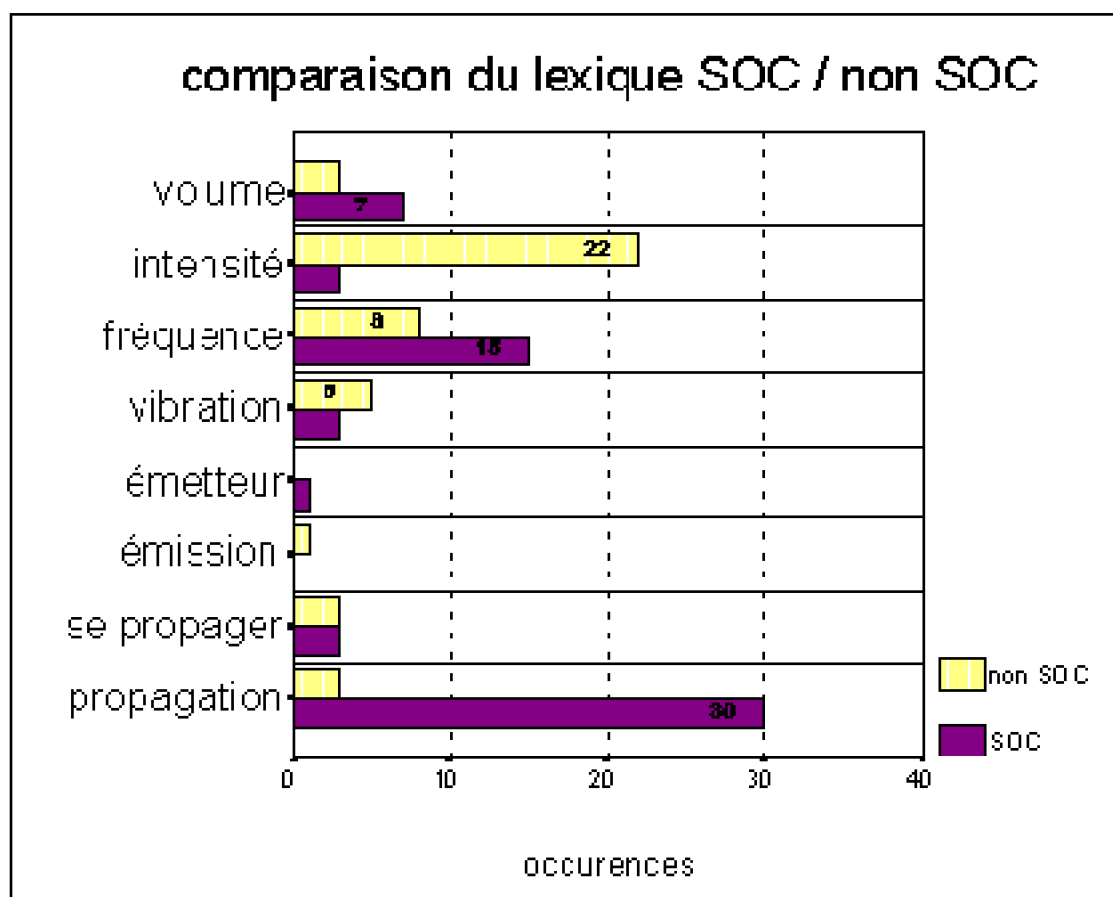
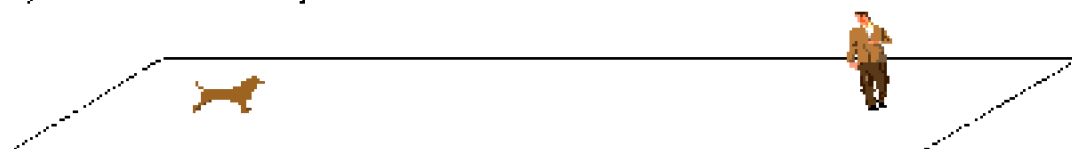


diagramme VIII.1-13 : question E, analyse lexicale selon la population

VIII.1.5 Question F

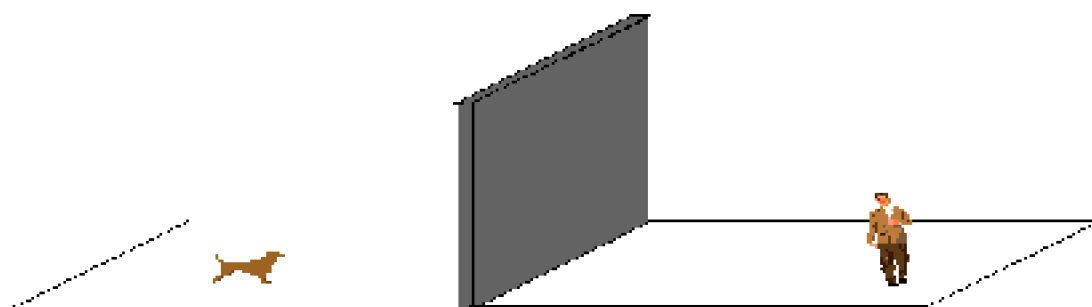
VIII.1.5.1 Énoncé

Une personne se confond avec un chien, alors que :



alors je me confonds avec elle, car nous sommes le même être, car la personne est la même chose (personne à entendre)

- ☐ que la personne est la même chose que la même chose.
C'est ce que j'ai dit.
- ☒ que la personne est la même chose que la même chose.
C'est ce que j'ai dit et c'est ce que j'ai dit.
- ☐ je ne sais pas



VIII.1.5.2 Présentation

Pour ne pas alourdir le questionnaire passé après enseignement, cette question n'a été posée qu'avant enseignement.

Nous cherchons ici à étudier l'influence que les élèves attribuent à un mur sur un son quotidien, en l'occurrence un aboiement. Notons que le mur a volontairement été représenté grand à l'échelle de l'émetteur "chien" et du récepteur "personnage" pour que son influence ne puisse pas être négligée.

L'enjeu est donc ici triple :

mieux connaître ce qui caractérise le "son" pour l'élève : le son est-il ou non modifié et qu'est-ce qui fait qu'il reste le même ou qu'il change ? Nous sommes alors conduit à étudier un problème similaire à celui déjà rencontré lors de l'étude de la question B

(sonnerie du téléphone perçue par deux personnages à des distances différentes). Notons cependant que, contrairement à la question B, le terme *son* n'est pas utilisé ici dans l'énoncé. On demande maintenant si la personne "entend la même chose", ce qui contraint moins quant à la caractérisation du son (par exemple, les élèves qui répondaient en B qu'on entend le même son mais moins fort pourraient dire ici qu'on n'entend pas la même chose). Finalement on demande ce qui contribue à définir l'identité de deux *perceptions* plutôt que l'identité de deux *sons*.

étudier la façon dont l'interaction entre la matière (le mur ici) et le son est décrite (et voir si elle est effectivement décrite) et interprétée, et le lien entre cette interaction et la sensation perceptive.

étudier le degré de conceptualisation utilisé pour justifier son opinion sur la situation proposée. Le contexte est ici clairement matériel et le problème est formulé en termes quotidiens uniquement. Aucune description de la situation d'un point de vue sonore n'est effectuée dans la mesure où la description des perceptions auditives (et en particulier de leur comparaison) est à la charge de l'élève. Les élèves vont-ils se contenter de décrire la différence perceptible (qui prouverait alors que le son est modifié) ou vont-ils aller puiser dans un savoir plus large et décontextualisé qui met en jeu des concepts de la physique ? Par exemple, on peut envisager une description générale de l'interaction entre le son et le mur.

Le cadre conceptuel induit ici est bien sûr le deuxième (*trajet, son hors source*). Cependant, dans la mesure où l'on demande de justifier si les sons sont identiques ou non, on peut éventuellement voir activé uniquement le cadre conceptuel 1 (*perception*). Enfin, la source présente ici peut être jugée suffisamment particulière pour contraindre la réponse (une autre réponse serait formulée si le son n'était pas un aboiement).

Remarquons à ce stade que cette situation semble assez éloignée des situations rencontrées et étudiées dans le cadre du contenu à enseigner. En effet, le savoir à enseigner de seconde donne relativement peu d'outils pour interpréter une telle situation. On peut penser à la partie concernant l'acoustique géométrique où la réflexion sonore est évoquée mais la diffraction (qui intervient ici) peut difficilement, même lorsqu'elle a été vue en cours, être invoquée pour cette situation (en cours, on ne parle à la rigueur que de diffraction par une ouverture). Par contre les connaissances acquises au sujet de la nature du son, ou des caractéristiques de sa propagation pourraient induire une évolution des réponses que nous ne sommes pas en mesure, rappelons-le, d'évaluer puisque la question n'a pas été posée après enseignement.

Précisons que d'un point de vue méthodologique, comme pour beaucoup d'autres questions, nous n'utilisons qu'une seule grille de codage pour les explications fournies, quelle que soit la case cochée.

VIII.1.5.3 Résultats essentiels

Une faible proportion de non réponse Par rapport à d'autres questions, la population étudiée se prononce largement sur la question soulevée. Ils sont moins de 4% à ne pas savoir si la personne entend la même chose ou pas. Parmi ceux qui se sont prononcés (238 élèves), 5% ne donnent pas d'explication. Il semble donc que ce soit une question qui d'une part intéresse les élèves, d'autre part ne leur pose pas trop de problème. La familiarité de la situation proposée contribue probablement à cet état de fait. Ces forts taux de réponses sont comparables à ceux de la question B (téléphone).

La personne n'entend pas la même chose Seule 13% de la population pensent que la personne entend toujours la même chose malgré le mur. Cette proportion est plus faible que pour la réponse "même son" correspondant dans la question B (33%). Comme on l'a dit auparavant, ceci peut en partie être expliqué par le fait que le vocable "la même chose" est moins restrictif que "le même son". N'oublions pas non plus que la situation n'est pas la même que celle de la question B (en particulier la cause de la différence perceptive est dans un cas la distance dans l'autre un nouvel élément matériel entre émetteur et récepteur). Il y a donc 83% des élèves qui pensent que la personne n'entend pas la même chose du fait de la présence du mur (diagramme VIII.1-14).

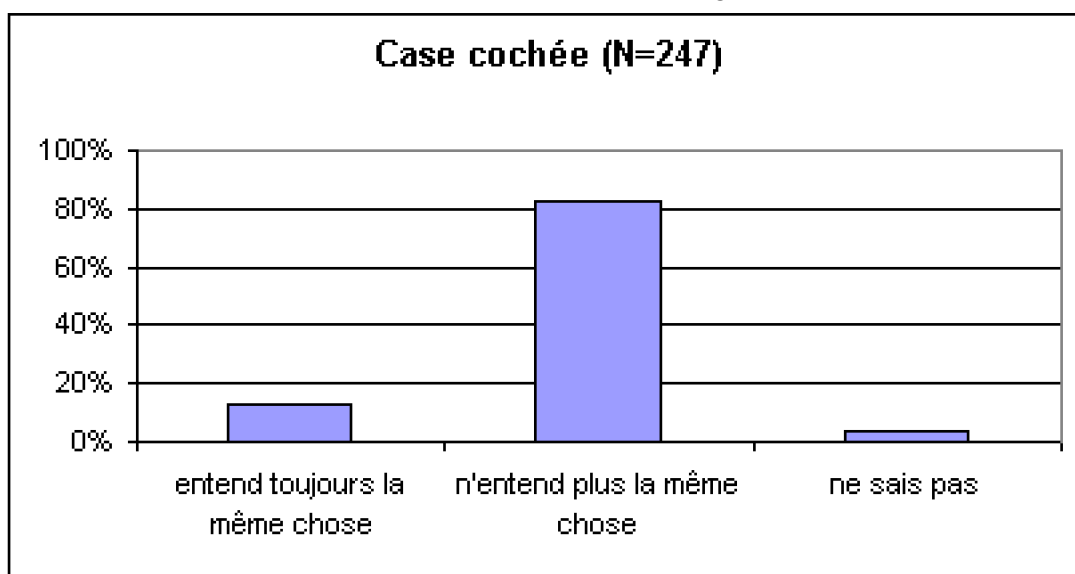


diagramme VIII.1-14 : question F, résultat du choix multiple

La description de la sensation perceptive comme justification Le quart des élèves (26%) se contente de décrire l'évolution de ce qui est entendu. Cette description fait foi de justification. Il n'y a de quoi s'étonner de ce relativement fort pourcentage, qui tranche avec ce que pourrait être le type de réponse fournie par la physique (qui ne se contenterait pas de la description des différences). La formulation invite ici à "justifier en disant ce qui change". Les élèves peuvent donc facilement se contenter de ce type de réponse sans éprouver le besoin de fournir des explications en terme de phénomènes ou d'événements. On verra plus loin la nature des descriptions faites.

Le mur comme un obstacle Près de la moitié des élèves indiquent que le son (ou au moins une partie du son) ne passe pas soit parce que le mur se comporte comme un obstacle ou un isolant (31% du total), soit parce que le son rebondit contre le mur (12%), soit encore parce que le son est retenu ou absorbé par le mur (5%). La conception qui consiste à voir le son comme quelque chose qui est stoppé par des surfaces matérielles est donc largement répandue. L'émergence de ce point de vue est renforcée par le fait que le mur est grand. Nuancions tout de même en n'oubliant pas que certaines des réponses laissent penser que la qualité d'obstacle du mur n'implique pas obligatoirement un son complètement stoppé. L'obstacle peut parfois être franchi. Quoi qu'il en soit, le fait que le mur puisse être traversé par le son est extrêmement *peu cité* (2% des justifications, ce qui ne veut pas dire que seulement 2% *pensent*, sans le dire explicitement, que le mur peut être traversé). De même la mise en vibration du mur, phénomène pourtant à l'origine de l'essentiel des nuisances sonores domestiques, n'est pas envisagé. On note aussi qu'environ 12% évoquent ici l'écho, le rebond, le son qui butte, ricoche, se répercute, ce qui peut paraître assez élevé. Ce taux est à rapprocher de celui observé pour un point de vue similaire lors de la question C (15% utilisent cette idée pour justifier qu'un son se déplace). Nous obtenons bien ici une confirmation du fait que des attributs de la matière continuent à être attribués au son (cf. chapitre III), en particulier dans son interaction avec des éléments matériels.

Ce qui arrive au son En dehors du trajet interrompu du son que nous venons de mentionner, nous observons aussi des justifications qui évoquent d'autres phénomènes hors de la source. Que le son traverse, contourne le mur, se répande, soit ralenti ou autre, ces justifications couvrent 16% des réponses. Seulement 6% (du total) évoquent par exemple un contournement du mur, pourtant relativement facilement envisageable en physique. Ainsi, si l'on regroupe ce type de réponse avec le précédent ("le son ne passe pas") on obtient 55% d'élèves se plaçant dans le cadre conceptuel 2, ne se contentant donc pas de décrire ce qui change, comme il était pourtant demandé.

Importance négligeable de la source de son Trois élèves seulement évoquent la dépendance de la situation selon la source sonore. La prise en compte du son émis n'est pas considérée comme pertinente pour la situation fournie et les justifications fournies seraient donc relativement constante quelque soit la source. Le diagramme VIII.1-15 résume les différents résultats mentionnés ci-dessus :

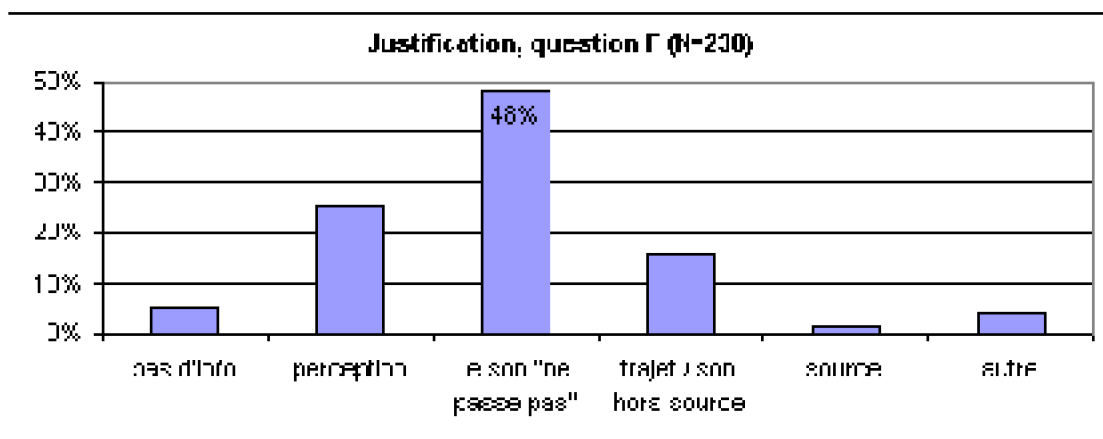


diagramme VIII.1-15 : question F, types de justifications

Justification des élèves pensant que le personnage entend la même chose Sur les 32 élèves pensant que le personnage entend la même chose, 13 (40%) se contentent de décrire, 8 (un quart) affirment que le son contourne le mur, et 5 que le son rencontre un obstacle ou rebondit. La moitié de ces élèves précisent que le son perçu est cependant moins fort, ce qui confirme, même sur un échantillon plus petit, ce que nous avons déjà vu lors de l'étude de la question B (même ordre de grandeur pour la proportion d'élève rendant compatible "même son" et "moins fort") : entendre la même chose n'est pas incohérent, pour certains, avec un son moins fort.

Description du changement Les catégories de description du changement sont quantifiées dans le diagramme VIII.1-16 ci-dessous.

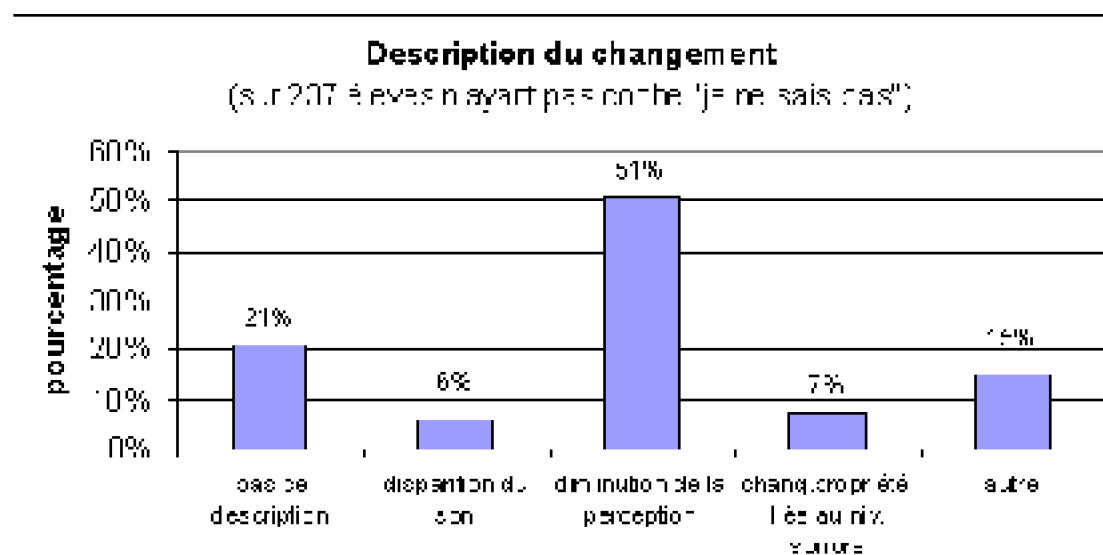


diagramme VIII.1-16 : question F, description du changement

21% des élèves ne décrivent pas le changement de perception. Plus d'un quart (28%)

indiquent que le son est moins fort ou plus faible et 12% vont dans le même sens en affirmant que l'on entend mieux (ou un son moins distinct, moins net...). Si on ajoute les mentions de *son atténué* (6%) et *son étouffé, filtré, sourd...* (4%), c'est au total 50% des élèves qui indiquent une diminution globale de perception. Nous percevons là un trait phénoménologique qui semble fort : un "obstacle" diminue la perception du son.

Les exemples suivants donnent une idée de la variété des réponses décrivant cette baisse de perception :

.
L07311 ***"Lorsqu'il y a une mur le bruit est plus sourd en quelque sorte étouffé"***

.
L07327 ***"le son ne parviendra pas de la même façon car il s'atténuera en traversant le mur"***

.
L11119 ***"le son est atténué parce que le mur fait barrière"***

.
L10215 ***"l'abolement du chien sera étouffé par le mur"***

.
L10223 ***"le son lui parvient étouffé, car la vibration du son se heurte au mur"***

.
L10233 ***"le bruit est plus etouffé, voir inexistant"***

.
L04115 ***"le mur a amorti le son"***

.
L07127 ***"la personne entend un son atténué car le son doit contourner le mur"***

6% des élèves affirment que le son a disparu, pourcentage nettement inférieur à celui des explications consistant à dire que "le son ne passe pas". En effet d'une part, cette justification peut être donnée sans description du son (on ne dit pas que le son a disparu), d'autre part, ceci confirme que le mur peut être vu comme un obstacle franchissable.

7% (16 élèves) décrivent le changement en terme d'une propriété du son liée au niveau sonore (essentiellement *intensité* puisque 11 de ces 16 élèves l'utilisent, les autres parlant de *puissance* ou de *volume*). Ceci qui peut paraître relativement important avant enseignement dans la mesure où les redoublants ne sont pas significativement plus importants dans cette catégorie. Il est en tous les cas remarquable de constater que le *terme* intensité (mais aussi *puissance* et *volume*) peut être facilement utilisé avant enseignement, ce qui contribue à l'affirmation d'un partage de cette notion entre sens commun et physique. A l'inverse, le terme *amplitude* n'est ici jamais cité.

On retiendra surtout la diversité du vocabulaire utilisé pour décrire l'évolution de la sensation perceptive. Nous donnons ci-dessous quelques exemples, non représentatifs mais donnant une idée de la variété et de l'originalité des descriptions :

·
L04108 *"l'abolement du chien aura une autre résonance"*

·
L07131 *"le son résonne à cause du mur"*

·
L01117 *"elle entend un bruit lointain"*

·
L10214 *"Lorsque le chien aboie, il y a la même puissance dans le son jusqu'à qu'il arrive au mur et comme le mur fait obstacle, le son va diminuer en faisant des échos"*

·
L07324 *"le son est arrêté par le mur donc il m'est plus longtemps à arriver vers la personne"*

·
L07325 *"le mur change la sonorité de l'abolement"*

·
L11104 *"le son s'adoucit car il est barré par le mur"*

·
L11120 *"le son est voilé, la sonorité n'est plus la même"*

·
L11130 *"le mur est un "isolant" il renvoie le bruit du côté du chien. Mais on peut quand même percevoir un bruit de fond"*

·
L02331 *"si le mur est assez grand la personne entendra quelque chose mais il ne pourra pas dire ce que c'était"*

VIII.1.5.4 Étude lexicale

Sur les 228 justifications fournies, les mots étudiés ne sont cités que 28 fois (12%), dont 7 fois par des redoublants.

Intensité est cité dans la moitié des cas, *vibration* 6 fois et *résonance* (ou *résonner*) 5 fois. On voit donc d'une part que le terme *intensité* est utilisé par certains avant enseignement et en référence au son, d'autre part que des termes comme *se propager* qui auraient pu apparaître ici ne sont quasiment jamais utilisés avant enseignement (2 sur 28).

VIII.1.6 Question G

VIII.1.6.1 Énoncé

Cochez une des trois propositions.

Un son,

- . ça n'existe que dans l'oreille Dans ce cas, expliquez
- . ça peut exister même s'il n'y a pas d'oreille Précisez alors quelques endroits où ça peut exister.
- . autre Dans ce cas, expliquez
- . je ne sais pas.

VIII.1.6.2 Présentation

Nous nous interrogeons ici sur les lieux d'existence possibles que les élèves attribuent aux sons. Cette question a donc à voir avec la nature du son pour les élèves. On étudie clairement ce qui est retenu par les élèves de la double facette du même terme son : sensation perceptive et phénomène physique (chapitre I).

Un point de vue anthropomorphique rend l'homme "créateur" du son qu'il perçoit dans la mesure où le son n'existerait que dans la perception auditive. Le son est alors réduit à son aspect perceptif. A ce stade on peut encore distinguer deux localisations possibles qu'on confond ici. Le son, réduit au stimulus sonore, peut exister dans l'oreille ou dans le cerveau, si le sujet a conscience du rôle central du cerveau concernant les sensations. Derrière ce point de vue on peut deviner une phénoménologie purement descriptive. Le son *est*, et il ne se déroule des phénomènes qu'à l'intérieur de la sphère corporelle, i.e. au delà du pavillon de l'oreille. Les sons (et tout ce qui les concerne) n'ont alors pas d'existence en dehors du corps. A ce point de vue correspond le cadre conceptuel 1.

Un point de vue que nous pourrions appeler "matérialiste" ne ferait exister le son que dans l'objet-source, lieu "de provenance" du son (ça ne veut pas dire qu'on pense pour autant que le son *provient* de là, mais juste que l'on voit que c'est à cet endroit qu'il s'est passé quelque chose en relation avec la perception sonore). Ce lieu n'est donc défini que comme l'endroit où on a pu voir un fait qu'on a mis en relation avec le son perçu. C'est ici la description du cadre conceptuel 3.

Enfin, la physique et le savoir à enseigner voient également le son sous l'angle d'une onde vibratoire, qui existe ainsi partout où l'onde peut exister (cadre conceptuel 2). Les "lieux du son" d'une part évoluent dans le temps, d'autre part dépendent fortement des milieux en présence. Potentiellement, toute matière, tout milieu peut être traversé(e) par un son.

Il est bien évident que ces différents points de vue ne s'excluent pas mutuellement et qu'on peut rencontrer des avis qui considèrent le son comme un objet physique interagissant avec l'oreille. La réponse "ça peut exister même s'il n'y a pas d'oreille" est

compatible avec ce genre de point de vue relativement élaboré, mais on a volontairement laissé la possibilité de cocher une case "autre" pour laisser libre court à des opinions qui souhaiteraient se démarquer de la dialectique *oreille / hors oreille*. Le savoir à enseigner est d'ailleurs parfaitement compatible avec des points de vue qui refuseraient le choix *oreille / hors oreille*. En effet, si en cours de physique c'est davantage la création et la propagation qui sont étudiées, le savoir à enseigner s'intéresse également à ce qui se passe dans l'oreille.

On peut bien sûr s'attendre à une évolution après enseignement au profit d'une existence du son "objet physique", en dehors de toute oreille. C'est en effet cette facette-ci qui est largement étudiée par le savoir à enseigner. L'étude de l'oreille comme récepteur auditif ne fait que renforcer ce point de vue, dans la mesure où le tympan est présenté comme une membrane qui, "plongée" dans un son, est mise en vibration par ce son.

Il n'y a donc pas vraiment ici de cadre conceptuel induit mais c'est plutôt le cadre conceptuel prédominant qui est questionné. Les choix proposés tendent cependant à privilégier légèrement les cadres conceptuels 1 ("sensation perceptive") et 2 ("son hors source").

VIII.1.6.3 Résultats essentiels

Une question délicate La question semble déstabiliser les élèves dans la mesure où 21% ne donnent pas de réponses (dont 17,5% qui affirment ne pas savoir). Ce résultat peut paraître relativement surprenant pour une question qui concerne pourtant la relation entre le son et notre perception. Cela tend en fait à indiquer que pour un bon nombre d'élèves, c'est la première fois que la question se pose. Ou alors certains de ces élèves sont déstabilisés par la question au point de chercher un éventuel piège. Ce résultat peut être vu comme un indice du fait que les élèves n'ont pas l'habitude de se poser des questions sur le son. Cette proportion est diminuée de moitié après enseignement.

Un rôle déterminant attribué à l'oreille Plus surprenant encore peut paraître la proportion de réponses affirmant que le son n'existe que dans l'oreille. Ils sont 31% à le penser avant enseignement, 27% après. On voit donc la solidité de ce point de vue sur lequel l'enseignement n'a que peu d'effet. Tout ce passe pour cette catégorie comme si le savoir à enseigner avait permis de travailler sur un objet qui n'est pas le son, ce terme restant réservé à la désignation de nos sensations. **Cette proportion assez importante tendrait donc à illustrer à quel point la tâche de l'enseignement consistant à étudier le son comme objet physique hors de l'oreille n'est pas a priori aisée.** Ceci va nécessiter un réel effort à ne pas négliger. Il faut relativiser la caractère "résistant" de ce point de vue dans la mesure où une étude plus attentive des évolutions individuelles des opinions montre qu'à peine la moitié des élèves affirmant l'existence dans l'oreille seule continuent à le faire après enseignement (36 sur 76). Dans le même temps, 35% de ces élèves ont changé d'avis et affirment après

enseignement que le son existe même s'il n'y a pas d'élèves. Il reste ensuite à savoir si c'est le savoir à enseigner qui contribue à faire passer 13 élèves de "le son existe même s'il n'y a pas d'oreille" à "le son n'existe que dans l'oreille". Le tableau VIII.1-4 ci-dessous détaille cette analyse en croisant les réponses avant et après enseignement.

Tableau VIII.1-4 : question G, croisement case cochée AVANT / case cochée APRES (sur 240 élèves ayant répondu avant et après), en effectif

		après					Total
		ne sais pas	dans oreille	même si pas oreille	Autre	pas de réponse	
AVANT	ne sais pas	6	10	22	2	1	41 (17%)
	dans oreille	8	36	27	4	1	76 (32%)
	même si pas oreille	5	13	82	3		103 (43%)
	autre		4	4	4		12 (5%)
	ne comprends pas	2	1	1	2		6 (2%)
	pas de réponse	2					2 (1%)
Total		23 (9%)	64 (27%)	136 (57%)	15 (6%)	2 (1%)	240

Remarque sur les justifications

Même si les justifications demandées dépendent énormément de l'item choisi, les réponses ont été codées avec la même grille. Dans ces conditions, il ne faut pas s'étonner de voir certains arguments utilisés uniquement par des élèves ayant coché une case donnée. Ainsi, les explications du type "si pas d'oreille alors pas de son", "le son n'existe que parce qu'on l'entend", "le son est fait pour être entendu" ou encore "seule l'oreille, le tympan sont capables de capter, de déchiffrer" (codes 11 et 12) sont quasi exclusivement mentionnées par les élèves ayant coché la case "ça n'existe que dans l'oreille".

Une baisse notable de l'importance donnée à l'oreille Avant enseignement, les explications qui invoquent la nécessité de l'oreille (et/ou du cerveau) ou la nécessité d'entendre pour qu'un son existe (codes 11, 12 et 13), recouvrent quasiment toutes les explications données par les élèves ayant coché "ça n'existe que dans l'oreille" (95% des explications avant, 78% après, les autres élèves ayant coché cette case ne donnant généralement pas de justification). Sur le total des justifications, l'importance de ce point de vue diminue fortement entre les deux passages (de 37% à 23% des justifications). La moitié de ces élèves restent dans ce cadre conceptuel 1 après enseignement, les autres migrant vers d'autres types d'explications, en particulier 18% (11 élèves sur les 60 ayant répondu de cette façon avant) répondent après enseignement en invoquant

l'existence ou la propagation du son dans un milieu (codes 21 et 22). Par contre très peu invoquent après enseignement un récepteur d'un autre type que l'oreille (code 14). Ainsi, pour résumer et simplifier, soit ces élèves continuent à attribuer une importance primordiale à l'oreille (cadre conceptuel 1), soit ils invoquent après enseignement le milieu de propagation (cadre conceptuel 2).

Une augmentation importante de l'évocation du milieu La prise en compte du milieu et le recours à celui-ci devient important après enseignement. Cette justification n'est évidemment citée que par ceux qui ont affirmé que le son peut exister même s'il n'y a pas d'oreille (et quelques-uns qui ont coché "autre"). Cet argument passe de 8% des justifications à 23% après enseignement. Cette réponse peut être qualifiée de scolaire dans la mesure où l'on peut raisonnablement l'attribuer à l'importance donnée par l'enseignement au milieu de propagation (dont l'effet est mesurable pour d'autres questions, C, E et N en particulier). Elle ne s'appuie pas explicitement sur des faits expérimentaux mais c'est bien plutôt un savoir scolaire qui est produit sans davantage de précision, comme si le fait d'avoir été appris en classe était suffisant pour être cité sans faire appel à une situation donnée. Ce type de réponse (et son évolution) est d'ailleurs à rapprocher de ce qui est mentionné dans les analyses des questions E ("*Si un son est émis plus fort est-ce qu'il va plus vite ?*") et N ("*Donnez une condition obligatoire pour faire un son*"). Notons là encore qu'il y a peu de constance individuelle sur ce type de réponse. Seuls 5 des 15 élèves ayant mentionné le milieu avant, continuent de le faire après.

Une légère diminution globale du paradigme réceptif (qui reste fort) On a déjà évoqué les réponses invoquant l'oreille ou la perception humaine. La décroissance importante de ces réponses cache en fait une diminution moins nette de toutes les réponses en termes de récepteurs sonores (y compris l'oreille donc). Si l'on regroupe toutes ses réponses (évocation de l'oreille donc, mais aussi d'autres récepteurs que l'oreille, ou de l'existence de sons non audibles par l'être humain) on passe de 45% à 39%. En fait, de tous ces types de réponses, l'un d'entre eux augmente de façon importante : l'existence d'autres récepteurs que l'oreille, que ce soit le microphone ou des animaux. Cette réponse est citée 5 fois avant (dont un redoublant), 21 fois après. Par contre la mention de l'existence de sons non-audibles n'évolue pas de façon significative (reste autour de 5%). Le faible pourcentage de cette catégorie peut sembler surprenant, surtout après enseignement, dans la mesure où les ultrasons ont été largement évoqués. **Les justifications procèdent donc moins par contre-exemples "concrets" que par l'exposé d'un savoir de type scolaire** (existence dans le milieu par exemple).

Le son peu décrit en tant que phénomène physique Les réponses invoquant le son comme un phénomène physique ou un objet de la physique sont assez peu nombreuses avant enseignement et le sont encore moins après (codes 251, 252, 253 et 26). Les vibrations, les ondes ou autres phénomènes existant tous en dehors de l'oreille ne sont quasiment pas cités (10% avant, 5% après).

Un appel aux autres sens inhibé L'appel au toucher (ou à la co-vibration qui nous fait sentir les vibrations) ainsi qu'à la vue, en proportion moins importante, concernent environ 9% des justifications avant enseignement, mais seulement 3% après. On voit à quel point le contexte de demande d'une réponse "scientifique" tend à faire disparaître ce type d'argument, dont l'importance a largement été discutée dans le premier chapitre de ce travail. Ceci peut être mis en relation avec le fait que le savoir à enseigner et les activités expérimentales traditionnellement proposées en cours exploitent assez peu ces façons de "sentir" la présence d'un son ou les phénomènes qui y sont associés. Nous avons vu que le groupe SOC proposait en revanche de telles activités (partie B). Enfin, l'appel à des sons existant au niveau de la source (codes 31 et 32) est relativement peu courant et stable (7% avant, 6% après). Ceci confirme que le cadre conceptuel 3 n'est ici que très peu utilisé.

VIII.1.6.4 Comparaison SOC / non SOC

On ne peut pas vraiment signaler de différence significative entre les deux populations étudiées, si ce n'est peut-être une progression plus importante de l'évocation d'autres récepteurs sonores que l'oreille pour la population SOC (15%, au lieu de 4% pour la population non SOC après enseignement, respectivement 1% et 4% avant).

VIII.1.6.5 Évolution lexicale

50 élèves citent au moins un des mots de la liste *L* avant enseignement, le même nombre après (19 élèves seulement avant et après). Il n'y a donc aucune augmentation quantitative des mots cités pour cette question.

Il n'y a rien de très remarquable à signaler au niveau des mots cités. On mentionnera cependant une augmentation importante de *récepteur* cité 8 fois avant, 19 fois après. *Vibration* passe de 29 occurrences (dont 6 par des redoublants) à 18. Voici donc une des rares questions pour laquelle l'évocation de vibration diminue (vibrer est juste citer une fois avant, deux fois après). Enfin, on pourra s'étonner de la faible présence de *se propager* et *propagation* (cités à eux deux 1 fois avant, 5 fois après) en particulier après enseignement. Ceci conforte l'idée que pour justifier leur réponses, les élèves ne font pas appel à un objet physique "son" en mouvement dans l'espace.

Vu les petits nombres en jeu, il n'y a aucune différence significative entre les deux populations étudiées.

VIII.1.7 Question I

VIII.1.7.1 Énoncé

Expliquez pourquoi il peut y avoir un son

- quand on frappe deux cailloux

- .
 - quand on frotte quelque chose avec une brosse
- .
 - quand on pince une corde de guitare
- .
 - quand on frotte une corde de violon avec un archet

VIII.1.7.2 Présentation

Nous posons ici une même question pour quatre situations de créations sonores différentes : qu'est-ce qui fait qu'on entend un son quand on mène telle ou telle action ? Les quatre situations sont volontairement différentes. La première (cailloux) et la troisième (guitare) sont en partie inspirées de recherches antérieures (Mazens, 1999 ; Asoko et al., 1992). Ces recherches montrent en particulier que les mécanismes d'explication de la présence d'un son semblent fortement différents selon la situation, en particulier selon ce qui est accessible par la vue ou selon les comportements qu'on imagine possible : on voit ou on imagine plus facilement une corde de guitare vibrer qu'on ne voit ou imagine des cailloux vibrer.

Nous varions les situations pour pouvoir :

. étudier les nuances induites par le l'utilisation inhabituelle de certains objets pour faire un son : frapper deux cailloux l'un contre l'autre n'a pas pour fonction habituelle de faire du bruit ou tout au moins il n'est pas courant de choisir ce type d'objet pour faire du bruit. A l'inverse agir sur le violon ou la guitare a forcément pour finalité de faire un son (si possible, même, harmonieux) ;

. étudier les nuances induites par le changement d'instrument de musique : nous avons choisi un instrument pour lequel on pince et on peut voir l'effet sur la corde et un instrument pour lequel on frotte avec un effet difficilement visible au niveau de la corde ;

. étudier les nuances induites par le changement de situations quotidiennes de création d'un bruit, à savoir taper ou frotter. On a pris soin aussi de choisir des objets différents tant dans leur fonction, comme déjà dit, que dans leur forme et dans leur consistance.

Nous aurions pu, au risque d'alourdir la question, diversifier encore les situations en proposant par exemple un instrument à vent telle que la flûte à bec (pour laquelle il n'y a pas de vibration matérielle de la flûte). Nous avons cependant préféré nous en tenir à ces quatre situations.

Nous tentons, à l'aide de cette question, de connaître les mécanismes qui sont avancés par les élèves pour l'existence du son. Du point de vue de la physique, cette question serait à rapprocher de la question N ("*Donnez une condition obligatoire pour faire un son*") mais il n'est pas évident que les réponses fournies par les élèves aux deux

questions possèdent des similarités importantes. En effet si la question N est formulée de façon à obtenir une réponse générale, hors de tout contexte, la question est ici formulée quatre fois pour quatre situations différentes. L'élève a donc toute la liberté de répondre ici en décrivant l'action menée ou le comportement des objets en jeu bien plus qu'en invoquant des phénomènes généraux qui ne seraient que contextualisés par les objets présents. La demande de réponse pour chacune de ces situations peut même être vue comme une invitation à diversifier les éléments de réponses. Quoi qu'il en soit, nous pouvons espérer observer s'il existe pour les élèves des phénomènes qui sont inhérents à la création sonore ou si c'est d'abord les propriétés des objets en jeu qui priment. Notons que ces deux points de vue ne s'excluent pas : on peut décrire pourquoi il peut y avoir un son quand on pince une corde de guitare soit en expliquant que c'est parce que la corde vibre et par suite la caisse de résonance soit en expliquant pourquoi cette corde peut vibrer (elle est tendue mais souple par exemple). Nous aurons avant tout une indication sur le niveau de réponse qui a été choisi par l'élève, sur ce qu'il a jugé être déterminant pour l'existence du son.

Nous pourrions surtout savoir si, face à des situations variées aux effets similaires (tout au moins de même nature), les élèves adoptent des explications très contingentes aux objets et aux actions menées, ou bien des cadres explicatifs communs à toutes les situations, inévitablement explicités, dans ces conditions, en termes plus conceptuels, voire plus scientifiques (cf. § VII.2.1).

Enfin, il sera intéressant d'observer dans quel cadre conceptuel se placent les élèves pour répondre à la question. Les situations étant variées au niveau des objets et des actions *a priori* responsables du son, c'est le cadre conceptuel 3 qui est nettement induit : l'attention est focalisée sur la cause matérielle du son, sur les objets identifiés comme les émetteurs. Ceci n'empêche pas, comme le ferait la physique, la mention d'autres conditions, concernant en particulier le milieu de propagation (plutôt cadre conceptuel 2). Nous observerons attentivement si ce cadre conceptuel est utilisé, seul, ou en plus du cadre conceptuel 1.

VIII.1.7.3 Rappel des résultats déjà obtenus sur des situations analogues

Dans une recherche déjà citée au chapitre III, Asoko, Leach et Scott (1991 et 1992) proposent quatre situations à des sujets ayant de 4 à 16 ans (40 à 50 sujets de chacune des 6 classes d'âge étudiées) : jouer une corde de guitare, taper sur une cymbale, souffler dans un tuyau d'orgue et taper deux cailloux l'un contre l'autre. Les élèves étaient invités à *faire effectivement les sons*, ce qui diffère évidemment fortement de notre situation. La question posée était : "Comment le son est-il fait ?" et se concentrait, par rapport à notre formulation, davantage sur la création. Les réponses étaient regroupées selon les catégories suivantes : action personnelle (a), mouvement de l'instrument (b), propriété de la source ou du matériau (c), implication de l'air (d), vibration de la source (e), vibration de la source transférée à l'air (f). Nous n'avons pas à notre disposition le détail des résultats, mais les résultats essentiels donnés par les auteurs sont les suivants :

pour les cymbales et la guitare, la vibration de la source est largement mentionnée,

même chez les jeunes enfants (autour de la moitié des réponses entre 4 et 6 ans, davantage ensuite). Le pourcentage atteint quasiment 90% dans les deux cas pour des élèves ayant l'âge des élèves de seconde en France. Dans le même temps et pour le même âge, la vibration n'est citée que dans 20% des cas pour les cailloux. La proportion d'individus citant la vibration de la source pour cymbales et guitare augmente au cours de leur développement ;

pour le tuyau d'orgue, le mouvement et l'implication de l'air prédominent ;

pour les cailloux, l'action personnelle (autour de 70%) ou la propriété de la source ou des matériaux (autour de 30%) sont largement citées.

Les auteurs mentionnent en guise de conclusion qu'aucun des élèves de 15-16 ans (environ 50) ne mentionnent la vibration dans les 4 situations. La seule idée utilisée pour les 4 situations est celle d'action personnelle (22% des enfants de 6 ans). Ces résultats, concluent les auteurs, renforcent l'hypothèse d'une absence de modèles généraux pour expliquer la production sonore.

Nous allons voir que nos résultats confirment ces grandes tendances, avec pourtant une question un peu plus ouverte et un contexte d'interrogation différent. Rappelons en particulier que les élèves n'avaient pas ici la possibilité de réaliser les sons, ce qui rend leurs réponses évidemment très dépendantes de l'expérience personnelle passée. En plus de la confirmation de ces tendances avant enseignement, nous allons pouvoir affiner les analyses et étudier l'effet de l'enseignement sur ce type de problème.

Par rapport à la recherche mentionnée ci-dessus, nous avons légèrement modifié les critères d'analyse. En particulier toutes les réponses invoquant une ou des vibration(s) ont été regroupées, ce qui n'empêche pas de regarder de plus près combien, parmi ces réponses, évoquent des vibrations en dehors de la source.

VIII.1.7.4 Résultats essentiels

Un fort taux d'absence d'information Le diagramme VIII.1-17 ci-dessous indique les taux d'absence d'information pour les quatre situations proposées (rappel : nous considérons qu'il y a absence d'information lorsque l'élève ne donne pas de réponse, écrit "je ne sais pas" ou paraphrase complètement la situation décrite) :

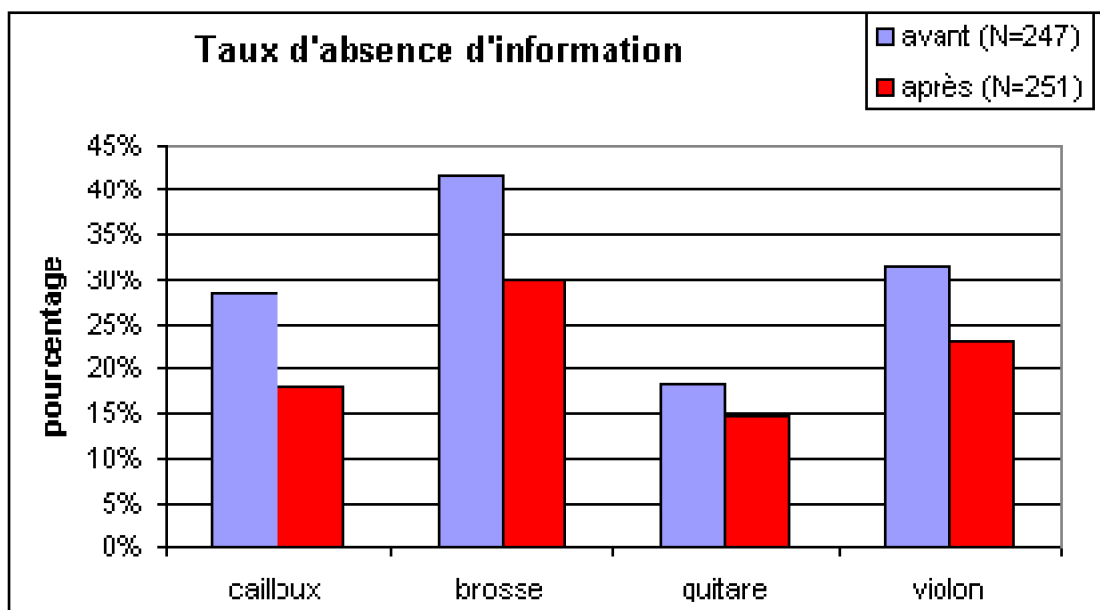


diagramme VIII.1-17 : question 1, taux d'absence d'information

Le taux de non réponse et d'incapacité à répondre est extrêmement élevé (en particulier par comparaison avec les autres questions, pour lesquelles ce taux ne dépasse quasiment jamais 20%), atteignant même plus de 40% avant enseignement dans le cas de la brosse. Ce n'est pas le manque de temps qui peut être invoqué dans la mesure où, aussi bien avant qu'après enseignement, la question n'était pas placée en fin de questionnaire. Ce taux diminue après enseignement, ceci pour les quatre situations mais reste assez élevé (de 15 à 30%). Les contenus d'apprentissage n'ont donc pas suffi à fournir un cadre général d'explication à l'existence d'un son. On remarque bien entendu que le taux d'absence d'information est plus faible pour la troisième situation. Ceci laisse penser que la création sonore à l'aide d'une guitare est la situation la mieux connue ou la plus facile à interpréter. C'est aussi la situation pour laquelle le taux d'absence d'information évolue le moins. La différence SOC / non SOC n'est, sur ce point, pas significative. Remarque : avant enseignement, pour les quatre situations, les non réponses et les réponses "je ne sais pas" sont en proportion similaire. Après enseignement, les réponses "je ne sais pas" sont globalement deux fois moins nombreuses que les non réponses.

Le cadre conceptuel 3 largement prédominant Comme nous pouvions nous y attendre, la perception est très peu mentionnée (entre 5 et 9 avant enseignement selon la situation, entre 5 et 11 fois après, ce qui donne des pourcentages toujours inférieurs à). Bien que plus utilisé, le cadre conceptuel 2 est également relativement peu adopté. Le diagramme VIII.1-18 donnent les nombres de réponses invoquant un événement ou une condition concernant le milieu, comme seule réponse (à gauche) ou combinée avec une condition sur la source (à droite). Au total, le pourcentage de réponses évoquant le milieu, ou quelque chose qui part de la source, qui est émis, ne dépasse pas un cinquième des réponses : de 7% (violon) à 10,5% (brosse) avant enseignement, et de

12% (violon) à 20% (cailloux) après.

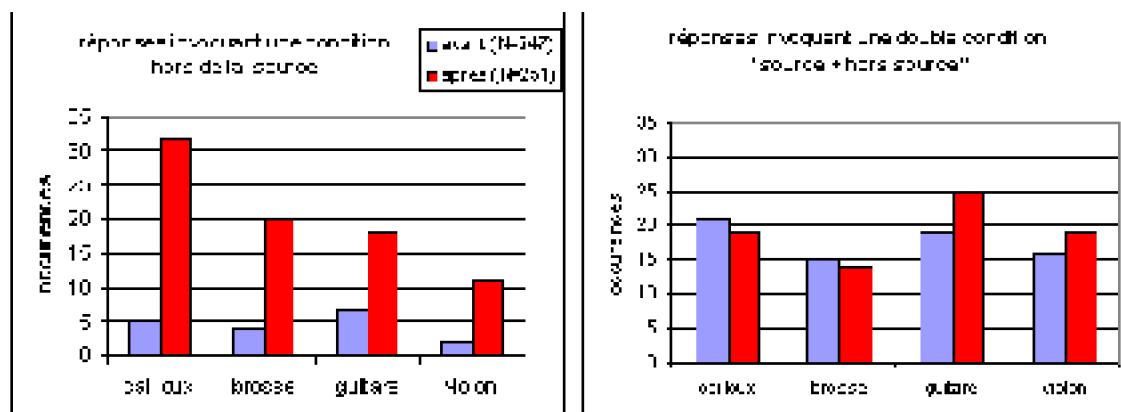


diagramme VIII.1-18 : question 1, évolution de l'utilisation du cadre conceptuel 2 selon la situation

Malgré le faible nombre de ces réponses, nous pouvons cependant noter une tendance à l'augmentation de la prise en compte et de l'invocation de ce qui se passe en dehors des objets sources.

Une invocation contrastée du concept de vibration Les catégories d'analyse sont assez nombreuses comparées à d'autres questions et sont regroupées selon les cadres conceptuels ; en conséquence l'évocation du concept de vibration peut avoir lieu dans des catégories différentes. Par exemple la vibration peut être citée en référence à l'objet source ou bien à l'air ou bien encore seule. Nous avons donc regroupé l'ensemble des réponses mentionnant le concept de vibration sans nous soucier davantage, dans un premier temps, de la façon dont il est mis à profit. Nous obtenons alors le diagramme VIII.1-19 suivant :

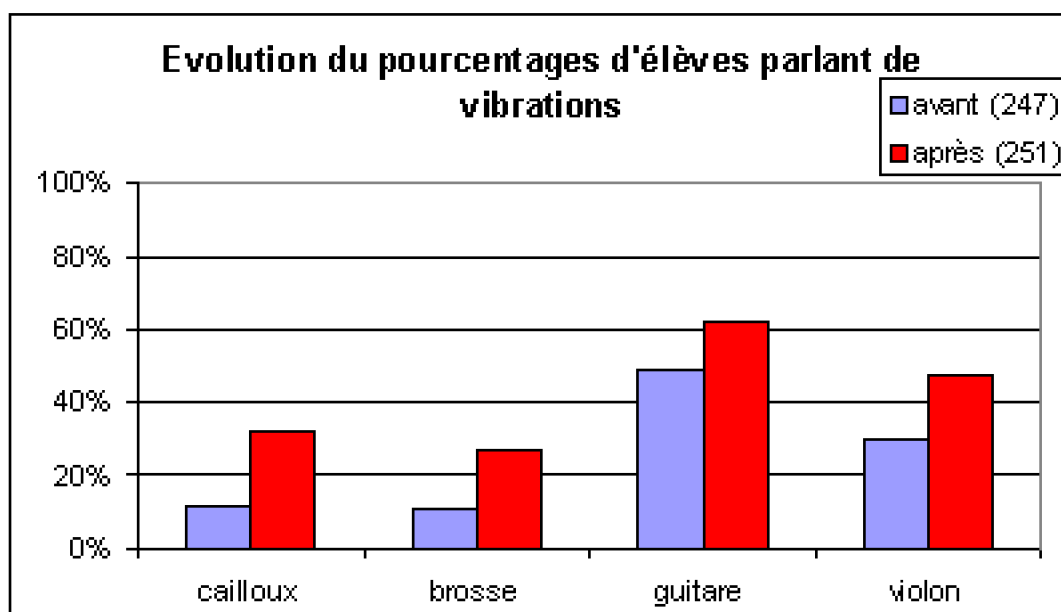


diagramme VIII.1-19 : question 1, évolution de l'évocation du concept de vibration

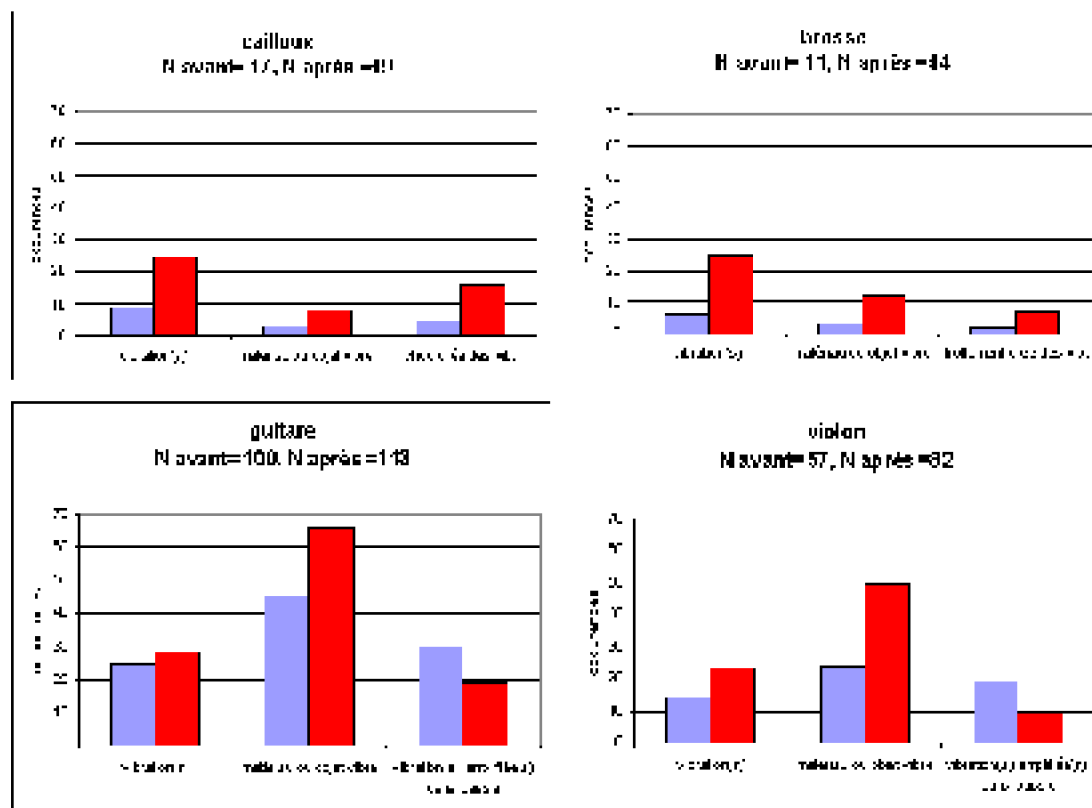
On voit donc se dessiner une ligne de partage entre les quatre situations. Les deux instruments de musique bénéficient d'un pourcentage relativement important, dans la mesure où ces pourcentages sont donnés sur l'ensemble des élèves, y compris ceux, nombreux, qui ne donnent pas d'explication. Ceci est surtout manifeste pour la guitare, même si l'on atteint pas les 90% de Asoko et al. (1991). Encore une fois ceci peut être attribué au fait que le son n'est pas effectivement créé par les élèves. Le violon est moins l'occasion que la guitare d'invoquer le concept de vibration. Et pourtant, il peut y avoir un effet important de la succession des situations proposées : le violon venant après la guitare, si la reconnaissance de caractères communs est effectuée (cordes et caisse de résonance en particulier), alors l'explication donnée pour la guitare peut être reprise pour le violon. Ce pourcentage plus faible pour le violon que pour la guitare peut être dû à une moins bonne connaissance de l'instrument (la proportion d'élèves ayant vu ou touché une guitare est bien supérieure à celle des élèves l'ayant fait avec un violon). Ce peut être aussi l'action menée sur les cordes qui induit ces différences. Si dans un cas, l'action de tirer une corde est suffisamment explicite pour imaginer et même voir le comportement futur de la corde, ceci est moins vrai lorsqu'on frotte la corde. Les actions de la corde de violon, simultanément passive ("être frottée") et active ("vibrer"), ne sont pas forcément compatibles pour le sens commun. Les deux autres situations, qui n'impliquent pas des instruments de musique, sont beaucoup moins propices à l'évocation de la vibration (autour de 10% avant, de 30% après). Il n'y a pas de différence significative pour ces deux situations. Il semble donc qu'il soit difficile pour les élèves d'envisager des vibrations avec ce type d'objets. Ceci peut être dû à la constitution même des objets mais aussi au caractère commun et évident de la création sonore si on fait de telles actions. On retrouve ici ce que nous avons déjà appelé des faits bruts, qui n'appellent aucune explication. Le fort pourcentage sur ces deux situations concernant les réponses en terme d'action ou de propriétés des objets (voir plus loin) tendrait à confirmer cette hypothèse. Quoiqu'il en soit, ces résultats confirment bien que pour décrire la création sonore **les élèves n'ont pas à leur disposition avant enseignement de modèle généralisable à des situations diverses : seuls 13 élèves (5%) évoquent le concept de vibration pour les quatre situations**. La situation évolue assez largement après enseignement. Le nombre d'élèves invoquant la vibration dans les quatre cas augmente de façon importante (58 élèves, 23%) mais nous pouvons considérer qu'il reste assez faible, eu égard l'importance que revêt la condition "vibration" dans le savoir à enseigner. Les situations sonores pour lesquelles il est difficile d'imaginer des vibrations semblent continuer à jouer un rôle déterminant. Par contre il est relativement surprenant de voir une évolution assez restreinte sur les deux exemples "musicaux", pour lesquels la vibration est plus facilement identifiable et donc utilisable après enseignement. Les réponses en terme de vibration couvrent cependant après enseignement 73% des explications fournies pour la guitare et 61% pour le violon. L'enseignement ne parvient pas à combler la différence initiale sur ce sujet entre les deux instruments.

Pour les instruments de musique, la source vibre Regardons plus précisément les types d'explications impliquant le concept de vibration. Les explications mentionnant explicitement des vibrations *du* milieu ou *dans* le milieu (codes 23_ , 73, 72, 74) sont

extrêmement rares avant enseignement (moins de 5 citations tous cas confondus) et peu courantes après enseignement (moins de 20 occurrences). Les explications qui dominent sont les suivantes :

- i.
"vibration(s)" sans autre précision ;
- ii.
"matériau ou partie d'objet qui vibre" ; auxquelles il faut ajouter : pour les cailloux :
- iii.
"le choc, l'impact crée des vibrations" ; pour les instruments de musique :
- iv.
"vibration(s) amplifiée dans caisse (de résonance)".

Il est remarquable de voir (diagramme VIII.1-20) que, avant enseignement, des quatre explications ci-dessus, a) est l'explication la plus fréquemment citée pour les cailloux et la brosse alors que c'est b) pour les deux situations instrumentales (dans des proportions bien supérieures, rappelons-le). Ceci confirme qu'il est plus facile d'imaginer un objet en vibration dans le cas des deux instruments de musique alors que dans les deux autres cas, la ou les vibrations sont difficilement attribuées à l'objet ou localisées sur l'objet. Remarquons de plus que, pour les instruments de musique, c'est l'explication concernant la vibration de tout ou partie de la source qui progresse le plus au cours de l'apprentissage, alors que la résonance de ou dans la caisse de résonance devient moins citée, signe que l'enseignement ne traite pas de ce type de phénomènes, pourtant connu (en partie) du sens commun.



diagrammes VIII.1-20 : question 1, évolution des modes d'implication du concept de vibration

Des descriptions en terme d'actions L'étude déjà mentionnée (Asoko et al., 1991) étudiait les réponses des sujets en terme d'action. Il est en effet intéressant de regarder si une redescription de l'action menée suffit à l'élève pour expliquer la présence du son. Ceci confirmerait l'existence de faits "bruts" qui ne demandent pas d'explication autre qu'événementielle et contingente à la situation. Nous ne comptabilisons ici que les explications ne mentionnant *que* l'action, en excluant celles qui font mention d'autres éventuels phénomènes qui en résulteraient (en particulier des phénomènes de vibration). Nous nous bornons donc aux réponses du type "c'est à cause du choc", "c'est parce qu'on tape", "c'est parce qu'on frotte"..., mais aussi aux réponses indiquant qu'un instrument de musique est fait pour faire du bruit. Sans aller jusqu'à parler de complémentarité avec le concept de vibration, il est remarquable de noter que c'est pour les situations où le concept de vibration est rarement évoqué que l'action est la plus

utilisée. Les résultats sont regroupés dans le diagramme VIII.1-21 ci-dessous.

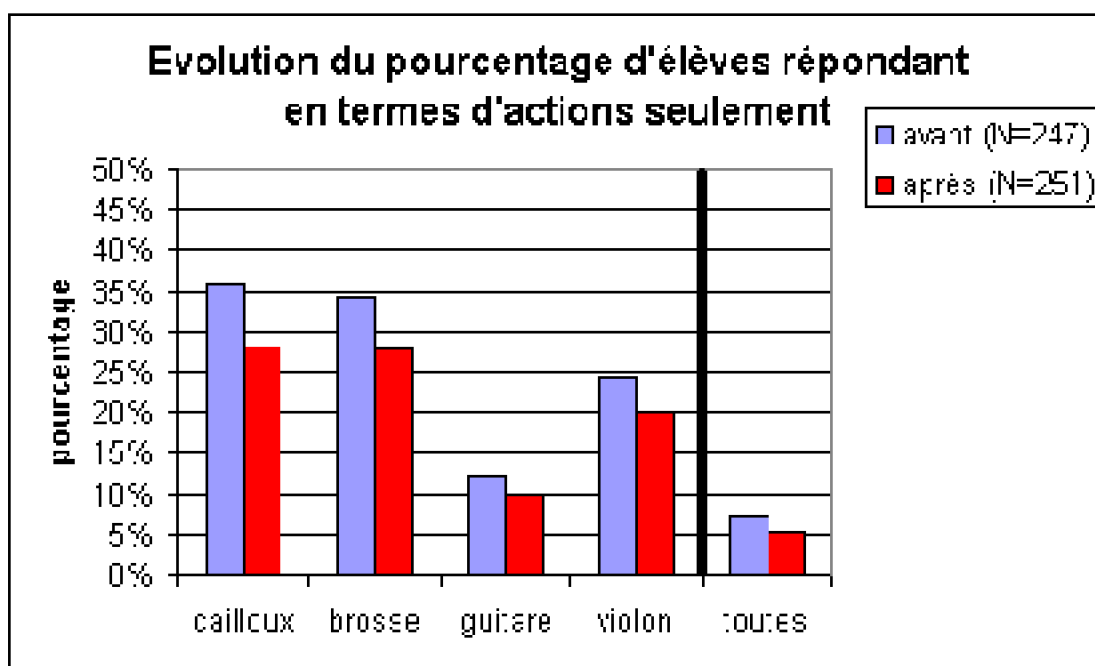


diagramme VIII.1-21 : question 1, évolution des réponses en termes d'actions

Les pourcentages atteints sont moins importants que pour les réponses en termes de "vibration(s)" mais sont néanmoins conséquents pour les deux premières situations (presque 40%). Ce point de vue est également largement cité pour le violon. Il apparaît ainsi comme un recours facile face à des situations qui paraissent difficiles à expliquer par des registres de savoirs plus conceptuels. Ce point de vue est assez résistant à l'enseignement dans la mesure où l'on constate peu d'évolution (en particulier pour les deux instruments de musique). Nous pouvons tenter d'expliquer le fort taux de réponses de ce type pour les deux premières situations par la proximité de l'action cause avec ce que Chion (1998) appelle un schème sonore, tel le schème sonore du frottement :

"lorsqu'on reconnaît une certaine forme sonore spécifique qui se trouve être associée à une certaine forme de causalité, on peut dire qu'on est au niveau du son, plus au niveau de la cause. Un certain type d'activité causale produit un certain type de son, et ce dernier devient un schème sonore caractéristique, détaché de la cause. Ainsi le modèle du flux et reflux sonore nous est donné évidemment par la nature [...]. Ce schème devient un schème sonore prégnant, assimilé, qui existe indépendamment de l'évocation qu'il suscite. Quoi que ce soit qui frotte, on a le schème sonore du frottement : va et vient, irrégularités, présence d'indices sonores matérialisants, grain" (Chion, 1998, p.308).

Chion conclut alors que des termes tels que *choc* ou *frottement* ont leur place dans "l'inventaire" des descripteurs sonores. Certes il n'y a pas reconnaissance d'un schème par écoute "d'un frottement" mais l'action de frotter peut permettre à l'élève de reconstituer, ou en tous les cas d'associer à cette action, un certain nombre de traits caractéristiques du schème. La cause de ce type de schème est alors l'action de frotter. Ainsi, ces réponses de type tautologique peuvent être le résultat d'un passage par

l'imagination du son produit qui est expliqué par l'action qui le créerait. De plus, là encore, la familiarité avec ces schèmes sonores permet d'envisager ces événements comme des faits bruts qui ne nécessitent pas d'autre explication que l'action menée, vue quasiment elle-même comme une description du son.

Descriptions en terme de propriétés de l'objet ou de la matière Les pourcentages d'élèves justifiant l'existence du son en mentionnant une propriété inhérente à l'objet ou au matériau le constituant sont beaucoup plus faibles que les précédents puisqu'ils ne dépassent pas 10% des élèves. La proportion de 30% obtenue à cet âge par Asoko et al. (1991) pour les cailloux est donc supérieure à celle que nous présentons ici. Il resterait à vérifier que les critères de classement sont bien les mêmes dans les deux cas (nous n'avons pas de moyen de le vérifier). La différence peut aussi s'expliquer par la possibilité dans le cas cité de toucher les cailloux et de les entrechoquer réellement (ce qui n'était pas possible ici). Les résultats obtenus sont regroupés dans le diagramme VIII.1-22 ci-dessous :

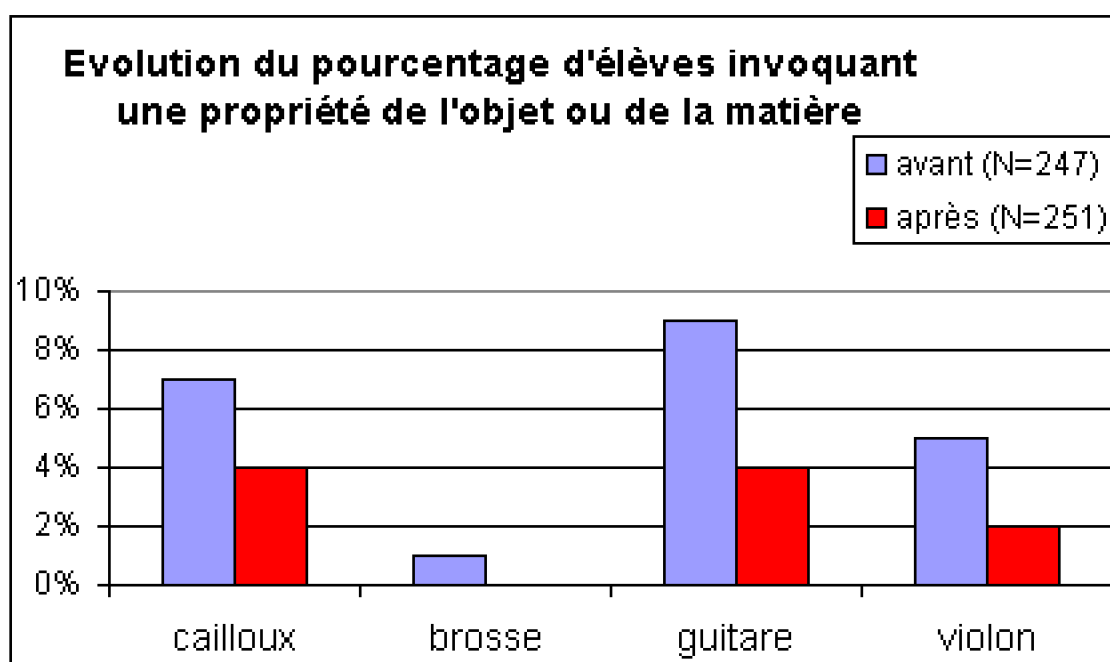


diagramme VIII.1-22 : question I, évolution des réponses en termes de propriétés de l'objet ou de la matière

Nous constatons que c'est la situation de la brosse qui suscite le moins ce genre d'arguments puisque le pourcentage est pour cette situation extrêmement faible avant et nul après enseignement. Par contre, les élèves invoquent plus souvent une propriété des cailloux (généralement *dur* ou *solide* dans 11 cas sur 17 avant). Le relativement fort pourcentage pour la guitare et le violon s'explique par la nature bien particulière de ces objets : en effet, deux caractéristiques sont essentiellement citées : la présence d'une caisse de résonance (8 réponses sur 22 pour la guitare avant, 6 sur 12 pour le violon) et le fait que la corde soit tendue (11 réponses sur 22 pour la guitare avant, 4 sur 12 pour le

violon). Ces deux paramètres sont même les deux seuls cités après enseignement. Nous voyons donc ici un effet fort de la fonction des instruments et de la connaissance que les élèves en ont au sujet du mécanisme d'émission. Toutes ces réponses voient leur fréquence décroître après enseignement, ce qui va dans le sens d'un recours légèrement plus important à des conceptualisations et des modèles explicatifs généraux.

VIII.1.7.5 Comparaison SOC / non SOC

Vibration Le contenu élaboré par le groupe SOC insiste énormément sur le lien causal qui existe entre son et vibration de tout ou partie de la source (grâce en particulier au *Modèle de la vibration*, détaillé dans le paragraphe VI.4.1, et aux activités dans lesquelles il est impliqué). Nous verrons plus loin (en particulier questions A, T) que ce qui fait la spécificité de ce contenu réside surtout dans la façon dont on caractérise la vibration en relation avec les perceptions sonores. Il est cependant dès à présent intéressant de remarquer une légère tendance à une progression plus nette de la présence du concept de vibration pour la population ayant suivi le contenu SOC. Ceci est illustré par le diagramme VIII.1-23 suivant :

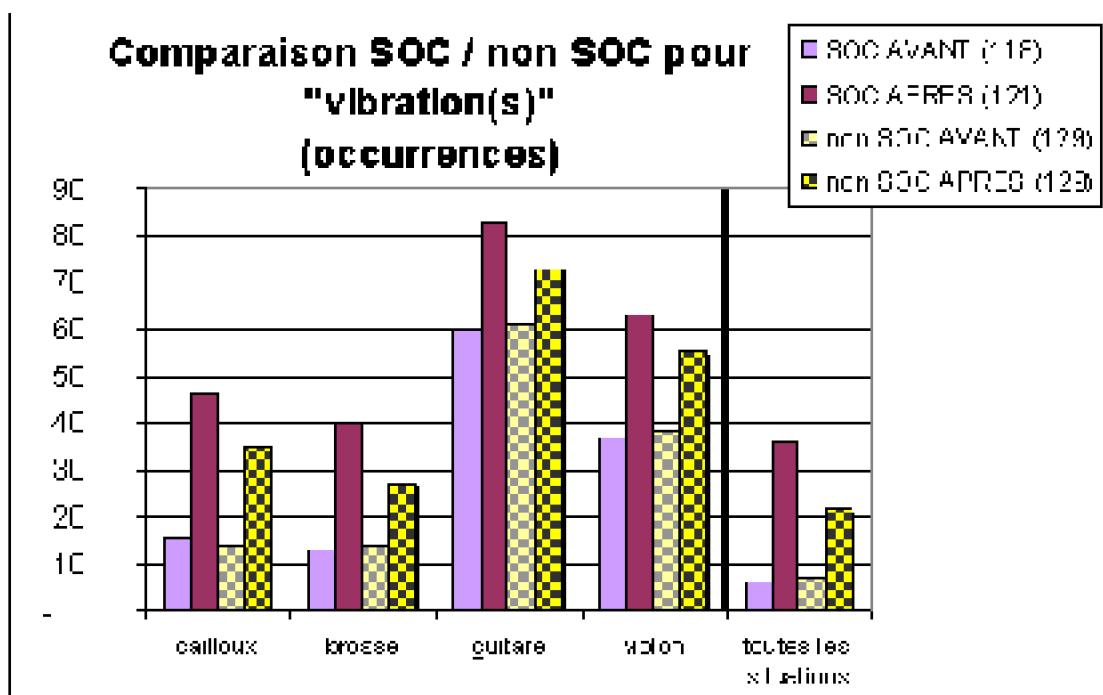


diagramme VIII.1-23 : question I, évolution de l'évocation du concept de vibration selon la population

Notons que sur les 13 élèves mentionnant le concept de vibration avant enseignement, il y a globalement équipartition SOC / non SOC (respectivement 6 et 7), et sur les 58 après, il y a plus d'élèves ayant suivi la progression SOC (36 contre 22). Il faudrait alors étudier des populations plus grandes pour pouvoir affirmer le caractère significatif de cette tendance.

La source vibre : une évolution concernant quasi exclusivement la population SOC On a déjà dit que la vibration de tout ou partie de la source était une explication assez répandue, en particulier pour ce qui concerne les deux instruments de musique (de l'ordre de 40% des explications invoquant le concept de vibration après enseignement, de l'ordre de 20% du total des élèves). Il paraissait intéressant de regarder si les élèves ayant suivi la progression SOC étaient davantage concernés que les autres dans la mesure où le contenu SOC insiste fortement sur la nécessité de la vibration de tout ou partie de la source pour avoir un son. Les occurrences des réponses mentionnant la vibration de tout ou partie de la source (la corde ou la caisse de résonance par exemple, ou la matière constituant la source), ainsi que leur évolution sont regroupées ci-dessous selon l'appartenance à la population SOC ou non.

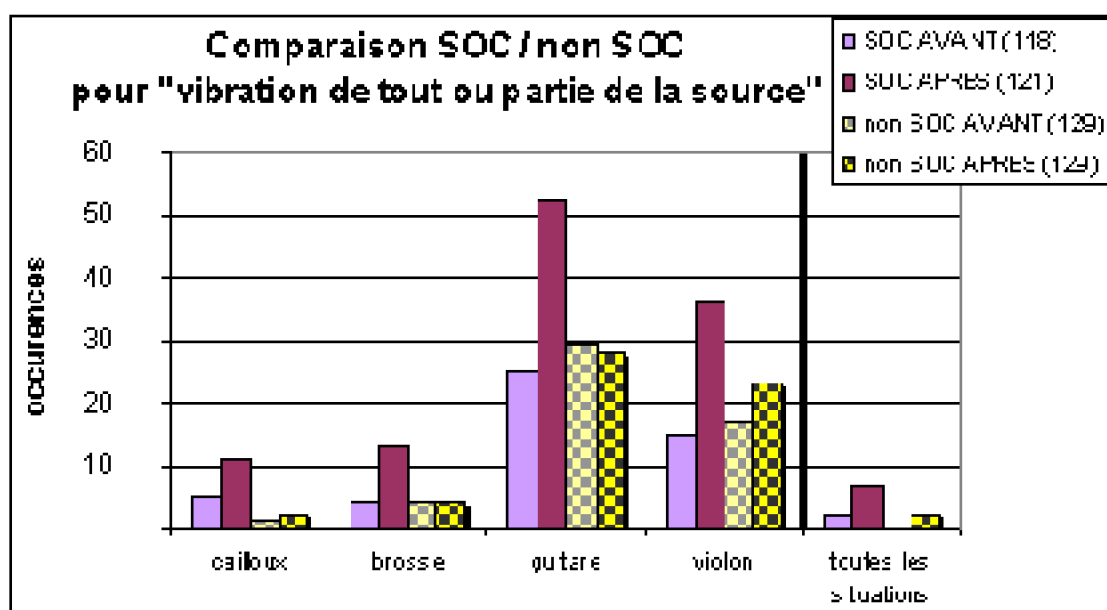


diagramme VIII.1-24 : question 1, évolution de l'invocation de la vibration de tout ou partie de la source selon la population

La différence entre les deux populations est ici très nette, amplifiée bien sûr pour les situations où les occurrences sont importantes (les deux instruments). Pour toutes les situations, le nombre d'élèves ayant suivi le contenu SOC et répondant de cette façon double globalement alors qu'il reste sensiblement constant pour l'autre moitié de la population. Ainsi **l'évolution que nous avons signalée auparavant sur la population totale est entièrement due la population SOC**. Ceci confirme parfaitement que la progression SOC, plus qu'une autre, fait de ce point un fondement de l'enseignement sur le son. Ceci n'apparaît pas superflu dans la mesure où malgré cette insistance, ce type d'explication est loin d'être majoritaire, en particulier pour les deux premiers exemples. Pour la population SOC, ces réponses couvrent 49% des réponses exprimées (hors absence d'information) pour la guitare après enseignement, et 37% pour le violon après.

Le tableau VIII.1-5 ci-après donnent les pourcentage de réponses pour chaque population par rapport aux réponses exprimées (hors absence d'information)

. Tableau VIII.1-5 : comparaison des occurrences des réponses invoquant la vibration de tout ou partie de la source selon la population

	SOC		non SOC	
	AVANT (118)	APRES (121)	AVANT (129)	APRES (129)
guitare	25%	49%	28%	26%
violon	19%	37%	19%	24%

Descriptions en terme d'actions Nous avons vu que les descriptions en terme d'action seule diminuent légèrement entre avant et après mais qu'elles restent relativement importantes pour les deux premières situations (de l'ordre d'un tiers des élèves). Comme le montre le diagramme VIII.1-25, pour toutes les situations, le type de réponse concerne davantage la population non-SOC, y compris avant enseignement. Cette différence initiale est globalement conservée après enseignement dans la mesure où les deux populations délaissent dans des proportions similaires ces réponses après enseignement. On peut juste dire que la baisse est légèrement moins importante pour la population SOC, étant même nulle pour la situation du violon. Mais vu les petits nombres en jeu, cette différence ne semble pas ici significative.

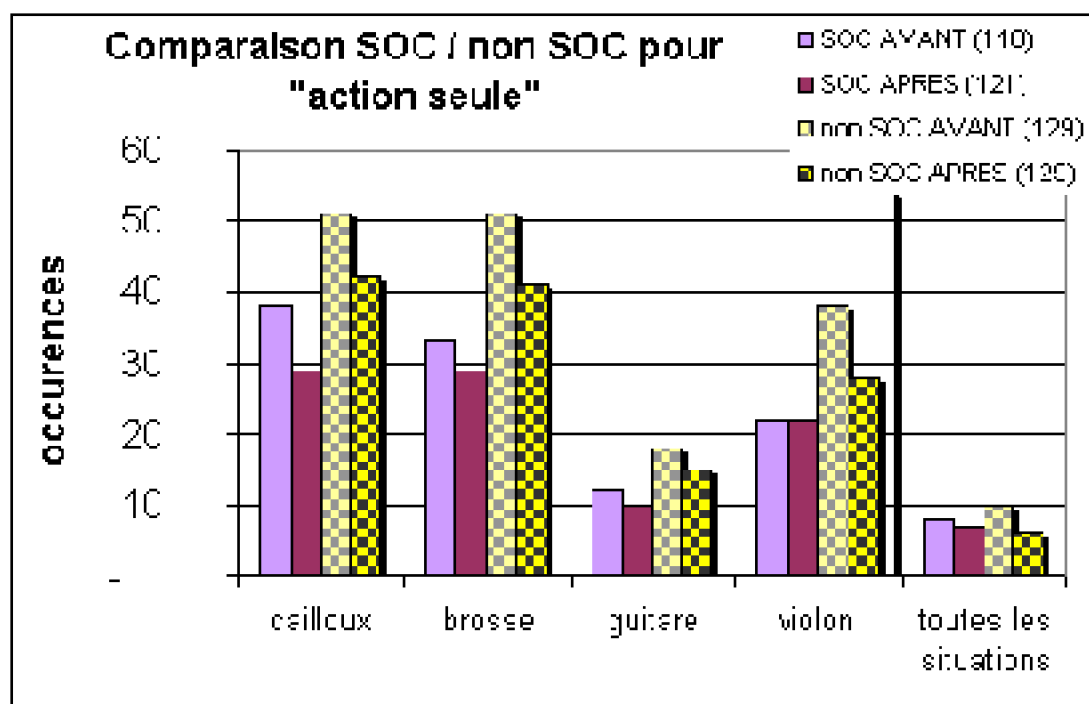


diagramme VIII.1-25 : question 1, évolution des réponses invoquant seulement l'action, selon la population

Description en termes de propriétés des objets Comme nous l'avons dit précédemment, le nombre de réponses en terme de propriétés des objets ne dépasse

jamais 25 (environ 10% des réponses). La comparaison des deux populations fait donc intervenir des nombres encore plus petits, ce qui a pour effet de ne pas rendre très significatives les éventuelles différences constatées. On peut cependant donner pour mémoire les résultats obtenus :

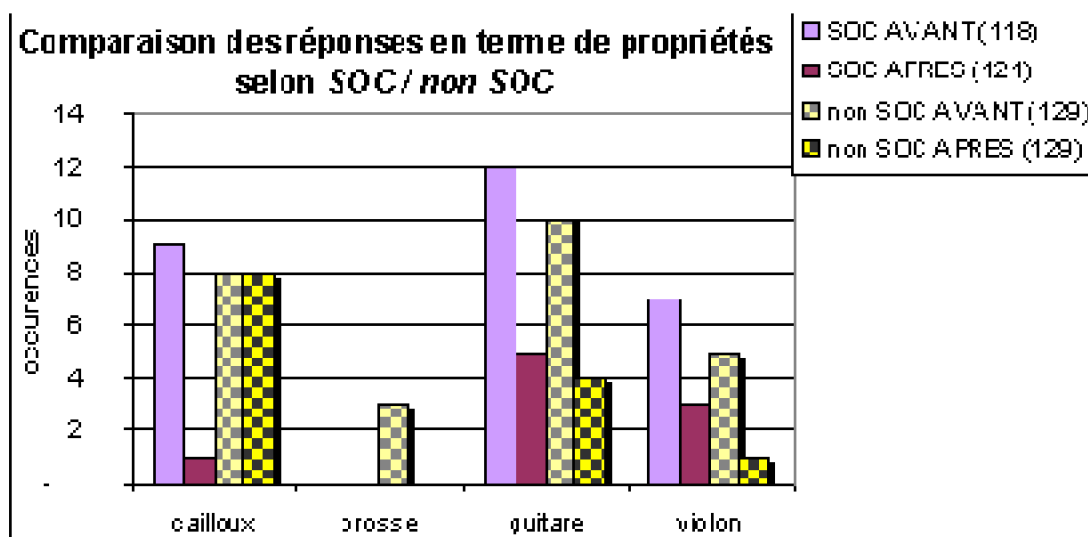


diagramme VIII.1-26 : question1, réponses en termes de propriétés, selon la population

Le seul fait remarquable est la baisse importante pour la population SOC sur la situation "cailloux" alors que l'autre population continue à répondre de cette façon dans la même proportion.

VIII.1.7.6 Évolution lexicale

D'un point de vue méthodologique, nous avons relevé la présence des mots de la liste *L* en confondant les 4 réponses. Nous ne pourrions donc pas fournir ici une analyse lexicale situation par situation. Cette analyse par situation est suffisamment exposée dans la partie précédente. De plus, la présence des mots *vibrer* et *vibration* est évidemment liée aux réponses en termes de vibration. Une telle étude est donc ici quelque peu redondante avec ce que nous avons dit précédemment. Notons aussi du point de vue méthodologique que nous n'avons pas relevé le terme *vibrer* quand *vibration* était cité et inversement. Il conviendra donc de mélanger ici les termes *vibrer* et *vibration(s)*.

161 élèves (65%) citent au moins un mot de la liste étudiée avant enseignement. 46 en citent deux et 4 trois. Ils sont 184 (73%) à le faire après enseignement. 36 en citent deux et 4 trois.

Nous constatons donc une légère augmentation de la présence d'un vocabulaire que nous jugeons relativement "scientifique".

Mais surtout, ces pourcentages de citations, en particulier avant enseignement, sont largement supérieurs à ce que nous avons pu rencontrer dans d'autres questions. Il semble donc que cette question suscite l'utilisation de ce type de vocabulaire. Cependant nous allons voir que ceci est essentiellement dû à la présence de *vibrer/vibration(s)*.

En effet, si l'on mélange maintenant l'ensemble des mots cités, et en ne mentionnant que les termes cités au moins une fois, on obtient les résultats suivants, en pourcentage de l'ensemble des citations :

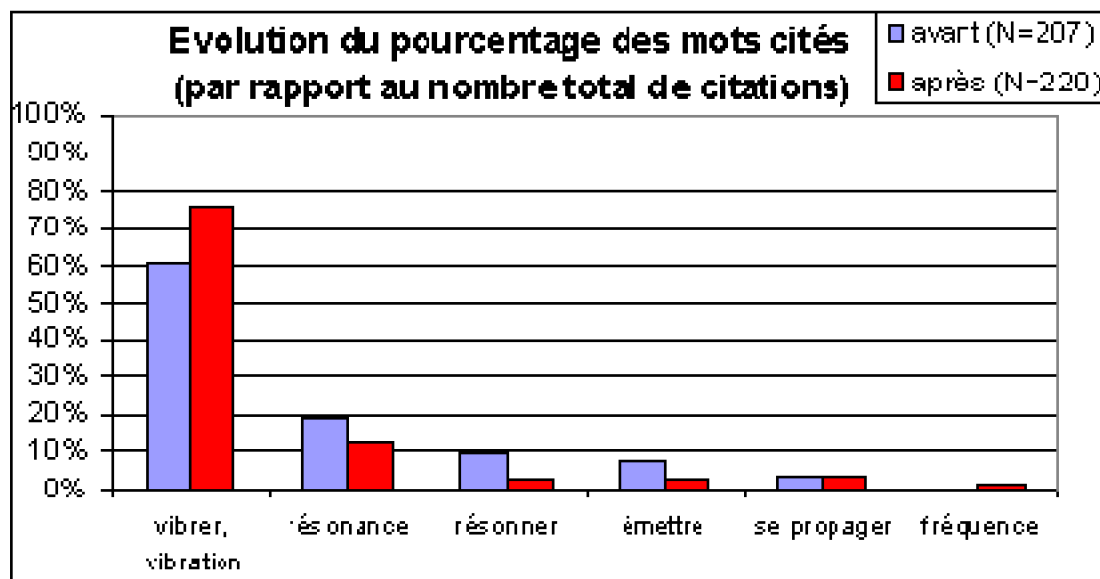


diagramme VIII.1-27 : question I, évolution du pourcentage des mots cités

Vibrer/vibration(s) occupent donc les trois quarts des citations après enseignement (suite à une augmentation, de 60% à 75%, déjà mentionnée lors de l'étude des réponses en terme de vibration(s)). La présence relativement importante des termes *résonance* et *résonner* est en assez grande partie due à l'existence d'une caisse de résonance pour la guitare et le violon.

Il y a pour cette question une très faible diversité des termes utilisés (parmi ceux de la liste L). Ceci peut paraître normal dans la mesure où l'intérêt est ici porté aux mécanismes de création sonore, peu propices à l'évocation de descripteurs perceptifs (*volume*, *intensité*, *aigu*, *grave*) ou à l'évocation de la *propagation* par exemple.

Il n'y a pas, au niveau de l'usage lexical, d'évolution significative entre les deux populations.

Signalons enfin qu'il n'y a pas de différence significative avant enseignement entre les pourcentages de citations concernant les redoublants et ceux concernant les non-redoublants.

VIII.1.8 Question L

VIII.1.8.1 Énoncé

Vous entendez la sirène d'une ambulance qui est à l'arrêt. Si l'ambulance se rapproche maintenant rapidement de vous, vous entendez le son de la sirène plus fort et plus aigu. Pourquoi le son est-il plus aigu quand l'ambulance se rapproche ?

VIII.1.8.2 Présentation

Malgré le contexte matériel et bien établi de la situation proposée, il n'est pas évident que les élèves jugent cette situation familière. Même dans l'hypothèse où les élèves ont déjà perçu (sans en avoir conscience) des sons de plus en plus aigus parce qu'issus d'une source se rapprochant rapidement, rien ne prouve qu'ils soient capables de faire le lien avec la situation proposée. Quand à la situation proprement dite (celle d'une ambulance se rapprochant), rien ne prouve que les élèves aient déjà constaté une telle évolution sonore dans pareil cas (il peuvent n'avoir rien remarqué ou ne pas percevoir cette évolution selon le caractère plus ou moins aigu).

Cette question propose une des rares situations du questionnaire auxquelles le savoir à enseigner ne peut apporter aucun élément direct de réponse (une connaissance qui serait directement exploitable pour interpréter cette situation). L'utilisation du savoir à enseigner pour interpréter après enseignement cette situation n'est pas immédiate et demande un niveau de compréhension et d'abstraction relativement élevé. Pour être capable d'interpréter ce que le physicien appelle l'effet Doppler (contextualisé dans le domaine sonore ici), il faut en effet :

adopter d'une part un point de vue microscopique (tout au moins envisager la propagation de zones comprimées et dilatées ou adopter une représentation équivalente) ;

imaginer d'autre part comment sont modifiées ces zones de compressions dans l'espace quand la source se déplace sans que la fréquence de vibration ne change ;

faire, enfin, le lien entre le son perçu et la fréquence de "perception" des zones comprimées.

Répetons que ceci semble une tâche extrêmement difficile pour un élève de seconde juste après enseignement, surtout en un temps très restreint et sans aide.

L'objectif n'est donc pas de savoir si les élèves vont être capables de résoudre "correctement" cette question, ce qui sera très rare, mais bien plutôt d'observer les mécanismes explicatifs mis en jeu sur une situation qu'ils ont pu rencontrer. Nous pourrons d'ailleurs juger de la crédibilité auprès des élèves de cette situation dont les faits sont relatés. Certains d'entre eux, s'appuyant sur ce qu'ils ont appris, vont-ils nier le caractère de plus en plus aigu du son, évolution sonore qui n'a pas été expliquée par le contenu scolaire ? L'expérience sonore aurait peut-être été plus efficace pour rendre compte de l'observation qui, formulée en langage naturel, peut ne pas être acceptée par certains sujets. La description en langage naturel induit des termes, et peut-être des représentations, qui ne seraient pas identiques avec l'expérience auditive. Nous avons donc bien conscience de la perturbation pouvant être causée, par rapport à la situation décrite, par les termes tels que "aigu", "fort".

Il est aussi intéressant d'observer le type d'évolution des réponses à une question qui sort du domaine d'application simple du savoir à enseigner. Les réponses vont-elles très peu évoluer, vont-elles être formulées en termes "plus scientifiques" ou bien vont-elles indiquer la tentative de se rattacher absolument à d'autres situations rencontrées au cours de l'enseignement ?

Il est difficile de dire a priori quel cadre conceptuel va pouvoir être appelé préférentiellement ici. Les sensations perceptives sont décrites, ce qui aurait tendance à minimiser le cadre conceptuel correspondant (cadre conceptuel 1 "perception"). Par contre, le fait que la source se déplace (seul fait variable dans la situation donnée) laisse penser que le cadre conceptuel 2 "son hors source, trajet" pourrait être utilisé pour répondre. Mais on peut aussi considérer que le mouvement de l'ambulance, *a priori* déterminant puisque donné comme le fait majeur lié à "plus aigu", est une propriété de la source sonore, auquel cas c'est moins la distance entre émetteur et récepteur qui va être invoqué que le déplacement même de la source. Notons que dans ce dernier cas, la modification du son, strictement lié au déplacement, serait la même que l'ambulance se rapproche ou s'éloigne.

VIII.1.8.3 Résultats essentiels

Un fort taux d'absence d'information Il était intéressant, pour les raisons invoquées ci-dessus, d'observer le taux d'absence d'information. On obtient alors le taux le plus élevé de toutes les questions étudiées. De plus, et ceci est également très remarquable, ce taux ne diminue pas après enseignement : 36% avant, 38% après. Notons qu'il y a plus de deux fois plus de réponses "je ne sais pas" que de non-réponses. Ceci confirme ce que nous avons envisagé, à savoir l'observation d'élèves démunis face à une situation qui n'est pas reconnue comme une situation voisine d'une situation traitée en cours. Les élèves ne parviennent donc pas à franchir les obstacles que nous avons mentionnés à ce sujet. Il est intéressant à ce stade de signaler que seulement la moitié (51%) des 90 élèves ne donnant pas d'informations avant enseignement restent dans cette catégorie après enseignement. Ainsi, sur les 257 élèves qui ont passé le questionnaire (au moins une fois avant ou après), 139 auront au moins une fois été dans l'incapacité de donner une information sur la situation, soit plus de la moitié du total des élèves (54%). Il était de plus intéressant d'observer les réponses qui ne consistent qu'en une reformulation de la situation. Nous considérons qu'il y a reformulation lorsque soit le rapprochement seul de l'ambulance est invoqué soit il y a mise en relation, comme dans l'énoncé, entre le rapprochement et l'évolution du son. Nous avons donc regrouper sous l'étiquette "reformulation" les réponses des types suivants :

- i.
parce que l'ambulance se rapproche, parce que la distance change
- ii.
rapprochement ou changement de distance donc c'est plus fort

iii.
rapprochement ou changement de distance donc changement d'une propriété liée au niveau sonore (amplitude ou fréquence)

iv.
rapprochement ou changement de distance donc c'est plus aigu (nous considérons cette réponse comme une reformulation dans la mesure où ces deux faits sont déjà corrélés dans l'énoncé)

v.
parce qu'on entend comme ça, c'est comme ça...

Nous obtenons alors 21% de réponses avant et 13% après enseignement (diagramme VIII.1-28). Notons que, aussi bien avant qu'après, les réponses de type a) constituent plus de la moitié des reformulations. On voit donc que la majorité de ces reformulations se contentent d'invoquer le rapprochement de l'ambulance, ce qui peut donc aisément être considéré comme de la paraphrase (partielle) de l'énoncé.

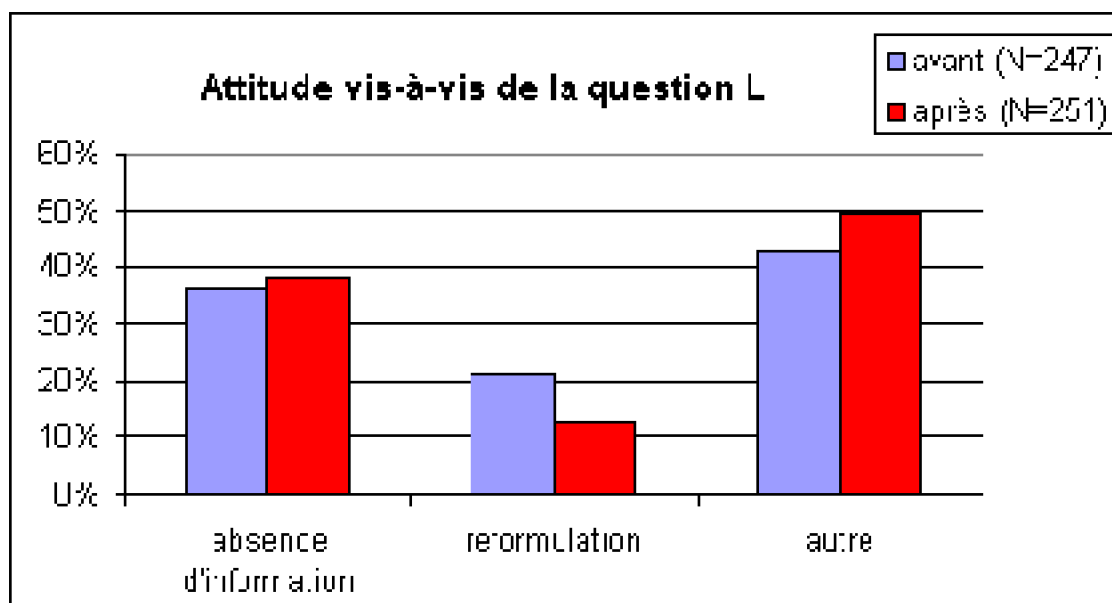


diagramme VIII.1-28 : question L, absence d'information et reformulations

Finalement en laissant de côté les absences d'informations et les reformulations, nous constatons que cette question ne "concerne" que moins de la moitié des élèves (43% avant, 49% après). Une reformulation ne signifie pas une absence de réflexion de la part de l'élève mais une impossibilité à se dégager de la situation et de la corrélation déjà signalée dans l'énoncé entre rapprochement de l'ambulance et son plus fort et/ou plus aigu.

Une variété importante d'explication et cadre explicatif Les explications fournies sont très variées même si la grande majorité des réponses se font dans le cadre conceptuel 2 "trajet, son hors source". En effet, très peu d'élèves (2 élèves avant, 3 après)

répondent en terme de source sonore (réponses du type *c'est du fait de l'ambulance ou lié au fait que l'ambulance bouge*). Au sein du cadre conceptuel 2, les réponses sont relativement différentes les unes des autres si bien que, compte tenu du faible nombre de réponses effectives (hors absence d'information et reformulation), il est assez difficile de dégager de grandes tendances. Avant de tenter cependant de préciser celles-ci, signalons quelques exemples de réponses qui n'ont pas prétention à être représentatifs mais qui donnent un bon aperçu de la diversité des réponses, des niveaux de connaissances variés auxquels elles font appel, et de la difficulté à coder certaines de ces réponses :

—

P01121 "car l'espace entre moi et l'ambulance diminue, donc les vibrations sont plus rapprochées donc la fréquence est plus élevée"

—

P10216 "car la distance T entre l'ambulance et la personne est moins grande. Or la fréquence = $1/T$ donc f sera plus grande et le son plus aigu vu que la hauteur d'un son dépend de sa fréquence."

—

P07308 "car les vibrations de la sirène sont plus rapides"

—

P07307 "le son est plus aigu car avec la vitesse le son ne peut pas rebondir sur un objet." Codé autre

—

P07331 "car le son aigu diminue en s'éloignant" codé 24

—

L13118 "parce que la vitesse accentue le son" codé 4

—

L02312 "les sons "aigus" sont plus "courts" que les sons graves, un son aigu est plus vite "camouflé" par les parasites contrairement à un son grave"

—

L10221 "c'est pour que les personnes dehors et ceux dans leur véhicule qui sont à plusieurs mètres sachent qu'ils doivent libérer le passage." codé 42

—

L07110 "les sons aigus ont une plus petite amplitude que les sons graves" codé 42

—

L07307 "car le son se déplace moins vite que la voiture" codé 42

—

L07331 "il est plus aigu car le son se mélange avec la vitesse donc vu qu'il était grave loin, il est aigu de prêt." codé 23

.

Un son aigu par nature, qu'on entend de mieux en mieux Avant enseignement, 29 élèves (12%) exposent plus ou moins explicitement l'idée selon laquelle entendre de mieux en mieux (du fait du rapprochement) un *son aigu* (au sens où c'est une de ces caractéristiques d'être aigu) rend le son plus aigu à notre oreille. L'idée est ici reformulée clairement par nos soins et le lexique des réponses n'est pas toujours celui-ci. Ainsi certains évoquent une meilleure perception du "vrai son", ou du son aigu de l'ambulance. Ceci est remarquable dans la mesure où le fait qu'on ait une sirène d'ambulance, étiquetée "son aigu", est, accompagné d'un rapprochement, déterminant. Tout ce passe comme si en percevant mieux le son on percevait mieux son caractère aigu. Ils ne sont plus que 15 à exprimer la même idée après enseignement (6 d'entre eux avaient déjà répondu ceci avant). Nous pouvons bien sûr considérer que ces réponses ont à voir avec le cadre conceptuel 1 ("perception"), puisqu'elles donnent une importance capitale à une propriété de la perception humaine et qui s'écarte fortement de ce que la physique entend par *aigu*.

Peu de corrélations explicites "plus fort donc plus aigu" Seulement 14 élèves avant enseignement et 8 élèves après enseignement font le lien causal explicite entre plus fort et plus aigu. On peut voir dans cette légère baisse l'effet de l'enseignement qui sépare caractère fort/faible et caractère aigu/grave. Ces réponses auraient peut-être été plus nombreuses si le son en question (et son évolution) avait effectivement été perçu. On a déjà dit, en parlant des reformulations qu'un nombre similaire d'élèves se contentent d'expliquer pourquoi le son est plus fort (par le rapprochement de l'ambulance).

Une progression de l'invocation de l'augmentation de la fréquence mais un taux qui reste faible Un élément fondamental du savoir à enseigner est la relation entre la perception de plus en plus aiguë et l'augmentation de la fréquence de vibration. Cependant, il n'y a pas de raison (en tous les cas le savoir à enseigner n'en donne pas) de penser *a priori* que, dans la situation proposée, la fréquence de vibration *de la source* varie (ce qui n'est effectivement pas le cas). C'est la fréquence de vibration de l'air au niveau de l'oreille qui augmente, si tant est que cette connaissance soit posséder et exploitable par les élèves. Il est donc intéressant de regarder si cette connaissance peut être réinvestie ici, en jouant sur l'ambiguïté au sujet de "l'objet" qui vibre : l'élève peut se contenter alors d'invoquer l'augmentation de *la fréquence de vibration*, sans dire ce qui vibre. Ceci a en plus pour effet de rendre le propos plus scientifique. Ce type de réponse progresse effectivement au cours de l'apprentissage mais parti de très bas (2 élèves dont un redoublant), il n'atteint pas un nombre très important (19 occurrences soit 8%). Ainsi, soit l'attention est focalisée sur la source (l'élève pense que seule la fréquence de vibration *de la source* est en jeu et que ça ne peut pas s'appliquer ici) soit le contexte et la formulation de la question rendent difficile un appel à des concepts de la physique. Notons enfin que nous n'avons évoqué ici que des réponses invoquant une augmentation seule de la fréquence et qu'elles ne couvrent pas toutes les réponses dans lesquelles la fréquence est mentionnée (voir l'analyse lexicale pour un dénombrement des emplois de *fréquence*). En particulier 3 élèves précisent après enseignement que le son est plus aigu parce que la fréquence de

vibration est plus petite.

Pour finir remarquons que quasiment personne ne tente d'interpréter la situation à l'aide d'un point de vue microscopique ou de l'évocation de compressions (aucun avant, 2 après), ce qui tend à confirmer l'hypothèse formulée au début de la présentation de cette question sur la difficulté du recours à une interprétation microscopique.

Remarquons également que quasiment personne ne nie le fait que le son devienne plus aigu (1 avant, 3 après) ni n'invoque une illusion auditive (2 avant, 4 après).

VIII.1.8.4 Comparaison SOC / non SOC

Vu les relatifs petits nombres de réponses en dehors de l'absence d'information et des reformulations, il est difficile d'établir des différences significatives entre les deux populations étudiées.

Nous remarquerons juste que les élèves ayant suivi la progression élaborée par le groupe SOC comblent leur retard en matière d'absence d'information. Ils étaient 55 à répondre "je ne sais pas" ou à ne rien répondre avant enseignement et ils sont 48 après, contre respectivement 35 (avant) et 47 (après) pour l'autre moitié de la population étudiée. Il se dégage ainsi une tendance selon laquelle les élèves ayant suivi le contenu SOC seraient moins démunis que les autres face à cette question.

Les réponses évoquant l'augmentation de la fréquence ne discriminent pas les deux populations (de 0 à 8 élèves "non-SOC", et de 2 à 11 élèves "SOC").

VIII.1.8.5 Évolution lexicale

En ce qui concerne les citations des mots étudiés, 73 élèves citent au moins un mot de la liste avant enseignement (21 en citent 2, 5 en citent 3), 104 élèves après (23 en citent 2, 3 en citent 3). Il serait risqué de comparer ces nombres à ceux rencontrés pour d'autres questions dans la mesure où le terme *aigu* contribue à leur donner une importance qu'ils n'auraient pas sans lui. Ce terme, présent dans l'énoncé, est très souvent repris dans la formulation de la réponse. Il n'y a aucune évolution à son sujet (54 fois avant, 53 après).

Le deuxième terme le plus cité avant enseignement, après *aigu*, est *grave* (12 fois) là encore par association avec *aigu*. Il n'est cité que 8 fois après enseignement.

Une fois décomptés ces deux termes, aucun autre terme ne dépasse 7 citations avant enseignement. Il n'y a alors plus que 29 mots cités avant enseignement (dont 6 par des redoublants). Cette question ne suscite quasiment pas l'usage du vocabulaire "scientifique" étudié. Ceci restant vrai après enseignement. La situation reste donc "quotidienne" et il est extrêmement difficile pour les élèves de l'interpréter à l'aide de concepts rencontrés au cours de l'apprentissage. Sans compter *aigu* et *grave*, il n'y a que 64 citations après enseignement, dont plus de la moitié (37) concerne *fréquence*.

À part *fréquence*, aucun terme ne voit son occurrence augmenter. Par contre, le terme *fréquence* est clairement un apport venant du savoir à enseigner. Associé à *aigu*, il est beaucoup plus cité (1% des élèves l'utilise avant, 15% après) mais reste relativement peu cité en comparaison d'autres questions où il est aussi fait mention du caractère aigu

(question S et T en particulier). Enfin, comme nous le verrons en d'autres occasions (question A, S, T), cette augmentation de l'usage de *fréquence* est essentiellement dû à la population SOC (diagramme VIII.1-29).

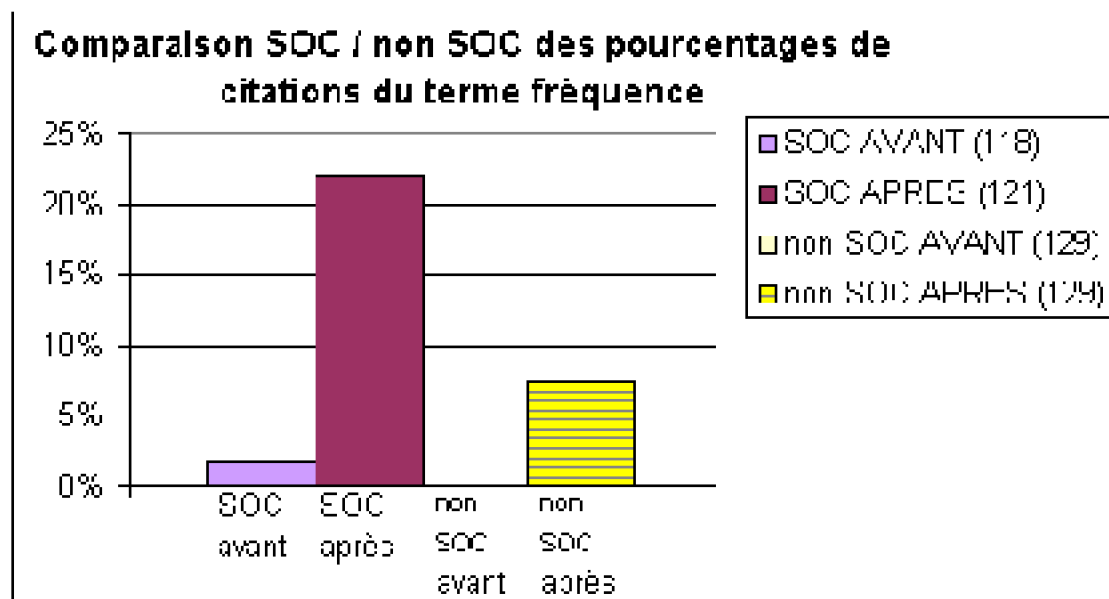


diagramme VIII.1-29 : question L, évolution de l'usage de fréquence dans les réponses

VIII.1.9 Question N

VIII.1.9.1 Énoncé

Donnez une condition obligatoire pour faire un son.

VIII.1.9.2 Présentation

Cette question n'est pas contextualisée. Aucune situation quotidienne n'est fournie et la question appelle une réponse *a priori* non contextualisée. La formulation et le phénomène en jeu ("faire un son") sont très généraux. Nous amenons ici le sujet à se placer à un niveau de savoir assez élevé et conceptuel puisqu'il est invité à synthétiser ses connaissances ou à choisir le critère qu'il estime déterminant pour l'existence d'un son. Notons à ce stade que l'expression "faire un son" n'implique pas forcément de se placer dans la cadre conceptuel "source, création sonore" puisque la question peut être comprise comme une demande de condition pour *qu'il existe* un son. Dans ce dernier cas, les résultats de la question G (au sujet des lieux possibles du son) nous indiquent que la présence d'un organe réceptif ou d'un milieu de propagation peut être choisi. Nous verrons que ce point de vue émerge en particulier après enseignement. Finalement nous pouvons nous attendre à observer, avant mais aussi après enseignement, des réponses concernant différents aspect du son :

concernant l'émetteur

—
une source particulière

—
un phénomène auquel doit obéir la source

—
mener une action particulière

·
concernant le milieu

—
avoir autre chose que du vide

—
avoir un milieu particulier (en particulier de l'air, milieu le plus commun pour les situations sonores quotidiennes et pédagogiques)

—
un phénomène siégeant dans le milieu

·
concernant le récepteur

—
avoir une oreille pour que le son puisse être entendu

—
avoir un capteur quelconque pour pouvoir observer une manifestation de l'existence d'un son

Cette liste n'est bien sûr pas exhaustive. On reconnaîtra ici les éléments de la chaîne sonore tels qu'ils sont présents par le savoir à enseigner.

Nous pouvons prévoir une influence assez forte de l'enseignement. Par exemple, le savoir à enseigner insiste sur la nécessité du milieu matériel pour qu'un son se propage. C'est quasiment la seule fois que l'élève perçoit explicitement une condition nécessaire à l'existence d'un son, sur laquelle le savoir à enseigner insiste.

Nous demandons *une* condition, ce qui induit un *choix* de la condition qui paraît la "plus nécessaire". Il faut cependant envisager les réponses "combinées", i.e. celles donnant au moins deux conditions. Nous avons retenu dans nos critères de codage les conditions combinées suivantes :

vibration + milieu de propagation	1.
émetteur + récepteur	2.

émetteur + milieu de propagation	3.
milieu de propagation + récepteur	4.
émetteur + milieu de propagation + récepteur	5.

Rappelons à ce stade que le contenu élaboré par le groupe SOC insiste sur la nécessité de l'existence d'une vibration de tout ou partie de la source pour la création sonore. Nous étudierons si ceci a un effet sur l'évolution des réponses.

Cette question devra bien entendu être comparée à la question I qui porte sur l'explication de l'existence de différents sons. La différence fondamentale entre les deux questions réside dans la formulation et le contexte proposé. La question I propose quatre situations courantes et il n'est pas fait allusion à une quelconque condition obligatoire. C'est davantage ce qui paraît déterminant pour l'existence du son dans chaque situation qui est alors demandé. Cependant nous garderons à l'esprit la possibilité de comparer les grandes tendances mises en évidence par l'analyse des réponses à chacune de ces deux questions.

VIII.1.9.3 Résultats essentiels

Un progression importante de la capacité à répondre Les absences de réponses et les réponses "je ne sais pas" sont relativement importantes avant enseignement (22%). Même si ce pourcentage n'est pas parmi les plus élevés rencontrés avant enseignement, il témoigne néanmoins d'une relative difficulté à donner un mécanisme général concernant la création de tous les sons. Il y a une réelle difficulté pour ces élèves à trouver un dénominateur commun d'ordre phénoménologique à toutes les situations sonores. Ce type de difficulté a déjà été révélé par l'analyse d'autres questions (en particulier la question I). Par contre ce taux d'absence d'information diminue considérablement après enseignement (6%, 15 élèves dont 4 ayant déjà fait le même type de réponse avant enseignement). Ainsi, le contenu de seconde semble apporter des outils pour répondre à cette question qui, rappelons-le, ne consiste pas à interpréter une situation particulière. La formulation de la question permet de rester au niveau des modèles (ou des notions théoriques) rencontrés durant l'enseignement. Ces connaissances peuvent ainsi être plus facilement réinvesties ici. Les chiffres cités ici sont mentionnés dans le diagramme VIII.1-30 suivant qui illustre aussi les grandes tendances des résultats que nous allons détailler maintenant.

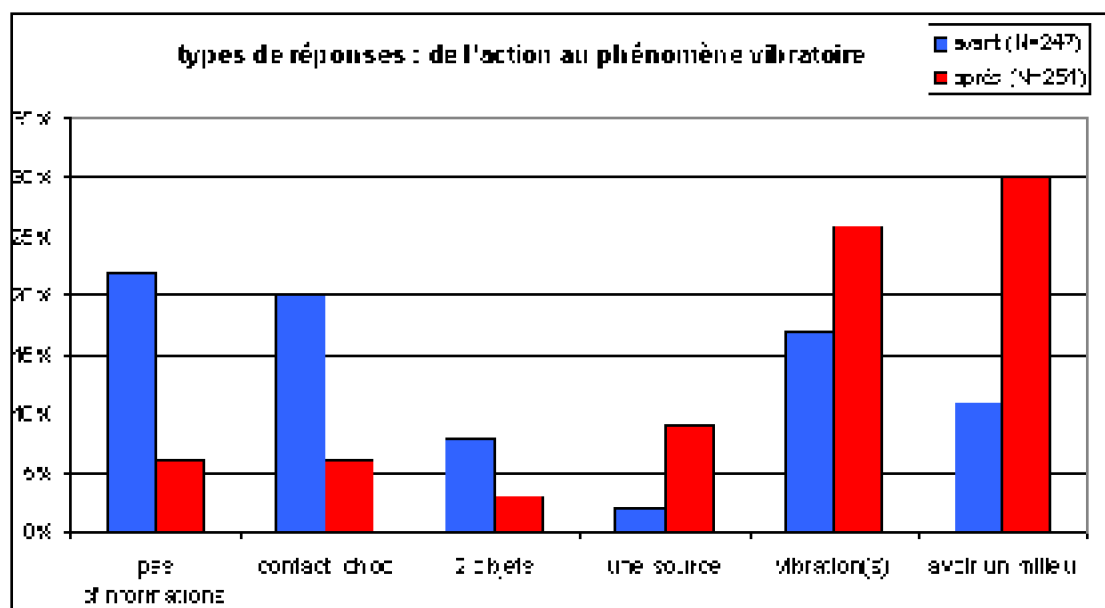


diagramme VIII.1-30 : question N, types de réponses

Des descriptions en terme d'actions de contact avant enseignement Comme pour la question I (en particulier les situations mettant en jeu les cailloux et la brosse), le recours à l'action et au contact entre deux objets matériels s'avère très utilisé avant enseignement. La démarche est cependant quelque peu différente ici. Tout se passe comme si les élèves puisaient à coût cognitif minimum dans une situation sonore simple la condition pour faire un son. La situation la plus simple qui soit (à part peut-être *parler*), ou en tous les cas la plus courante est celle d'un choc, même faible, entre deux objets matériels. De plus aussi bien avant qu'après enseignement, la question N était posée après la question I, ce qui pouvait induire le choix de situations de la question I, en particulier la situation des cailloux et de la brosse, pour fournir une condition de création sonore. En regroupant les élèves donnant comme condition la présence de deux objets (que le contact ou le choc soit évoqué ou non), nous atteignons 28% des réponses avant enseignement (69 élèves) ce qui représente plus d'un tiers des réponses exprimées (autre que non réponses et "je ne sais pas"). Avant enseignement une large proportion d'élèves invoquent donc une action de choc et/ou des objets matériels comme condition obligatoire à la création sonore. En ajoutant dans le même type de réponses les quelques élèves qui mentionnent un émetteur précis (voix (2), haut-parleur ou instrument (2) ou autre (4)) ou un mécanisme amplificateur (3 élèves), nous aurions alors un tiers des élèves. Rappelons que nous obtenons le même ordre de grandeur de réponses en termes d'action pour les deux premières situations (cailloux et brosse) de la question I avant enseignement. Par contre, nous avons vu que ce pourcentage ne chutait pas considérablement après enseignement. La prégnance de la situation doit donc jouer fortement puisque nous ne retrouvons pas ici cette faible baisse : pour la question présente, ce point de vue s'efface en effet considérablement après enseignement puisqu'il ne représente plus que 9% des réponses. Après enseignement, la condition citée concerne donc moins la description d'une situation

donnée ou l'action mais davantage des phénomènes plus généraux ou des concepts jugés fondamentaux pour l'existence du son. Voyons maintenant au profit de quelles réponses se fait cette baisse.

Un savoir de type scolaire qui émerge : le milieu comme condition nécessaire Une catégorie bien précise de réponse émerge nettement après enseignement. Elle peut se formuler de la façon suivante : "il faut qu'il y ait un milieu" ou "il faut autre chose que du vide". Ce seul point de vue passe de 3 à 22% des réponses. Cette augmentation est suffisamment importante pour être significative pour cette seule catégorie, mais le nombre d'élèves concernés augmente encore si nous ajoutons à ces réponses celles qui imposent pour condition la présence d'air ou d'un gaz puisque les pourcentages de réponses passent alors de 11% avant à 30% après enseignement (76 élèves), soit un triplement des réponses mettant en avant la présence d'un milieu pour faire un son. Ceci peut paraître d'autant plus surprenant qu'il ne s'agit plus là d'une condition sur la source (ce qui *fait* le son), mais davantage d'une condition pour qu'un son puisse effectivement exister et éventuellement être perçu, en d'autres termes pour qu'il existe une *onde* sonore. Nous avons déjà constaté l'émergence de cette connaissance lors de l'analyse de la question G (lieux du son), en particulier comme moyen de justifier l'existence de sons en dehors de l'oreille. Nous avons alors qualifié cette connaissance de scolaire dans la mesure où d'une part, sans être véritablement attendue, elle était présente essentiellement après enseignement, d'autre part elle était affirmée de façon nette mais sans davantage de justification. Nous retrouvons ici ces deux traits caractéristiques. En particulier cette connaissance est souvent fournie "brute" sans davantage d'exploitation ou d'explications. Si on regarde ce que répondaient avant enseignement les 76 élèves concernés, nous constatons qu'un cinquième répondaient déjà de la sorte : en effet sur les 27 qui répondent ceci avant enseignement (dont 7 redoublants) 16 continuent à le faire après. Une large majorité de ceux qui invoquent le milieu avant enseignement restent donc sur cette position après. Un autre cinquième répondaient en terme de contact et d'objets et un cinquième ne donnait pas de réponse ou ne savait pas répondre. Ce qui est plus surprenant est que 9 d'entre eux évoquaient avant enseignement la nécessité de vibrations. Pour ceux-là, l'importance du milieu est donc devenue plus importante que celle des vibrations. Enfin, si nous regroupons toutes les réponses qui correspondent plus largement au cadre conceptuel "trajet, son hors source" (CC2), à savoir les réponses qui invoquent une condition sur le milieu, on obtient 15% avant et 39% après. Les réponses qui sont prises en compte ici en plus de celle précisant qu'il faut un milieu sont des types suivants :

- vibration(s) du milieu ou dans le milieu ;
- existence d'ondes ;
- il faut une propagation (en tant que phénomène *nécessaire*) ;
-

point de vue microscopique (atteint 5% des réponses après enseignement)

Le concept de vibration : un phénomène nécessaire avant enseignement, et auquel le savoir à enseigner donne de l'importance Nous avons vu pour la question I une augmentation importante des réponses en terme de vibration, en particulier pour les deux instruments de musique guitare et violon. Il est donc légitime de se demander si l'on observe ici quelque chose de similaire. Cette interrogation est d'autant plus justifiée que nous touchons là une des connaissances centrales du contenu de seconde, à savoir la condition de vibration pour avoir un son. Nous avons bien conscience à ce stade que cette condition est plus ou moins explicitée, certains enseignants pouvant penser que cette condition a quelque chose d'évident. Si nous regroupons toutes les réponses citant le phénomène de vibration, que ce soit au niveau de la source, du milieu ou juste cité sans plus de précision, nous obtenons 17% des réponses avant enseignement et 26% après enseignement. Ces proportions sont moins importantes que celles mises en évidence pour les situations "guitare" et "violon" de la question I mais nous avons déjà expliqué que ces deux situations induisaient probablement une référence importante à la vibration du fait du comportement quasiment "observable" des cordes. Il peut cependant paraître surprenant de constater que ce pourcentage ne dépasse qu'à peine un quart des réponses après enseignement, étant ainsi en deçà de celui quantifiant l'invocation du milieu. Finalement, comme quasiment un cinquième des élèves choisissent de parler de vibration(s) avant enseignement, c'est l'évolution qui est relativement peu importante eu égard le caractère fondamental que revêt ce point de vue dans l'enseignement. La condition induite finalement par l'enseignement est davantage la présence du milieu que le phénomène de vibration. Deux indications supplémentaires de ceci :

—
sur les 53 élèves ne donnant pas d'informations avant enseignement la plus grande partie (15 élèves) donne ensuite la présence du milieu comme condition. Il ne sont que 12 à parler de vibration(s) ;

—
parmi les 41 élèves raisonnant "en vibration" avant, près d'un quart (9) optent pour une condition "milieu" après alors que seulement la moitié environ (19) continue à évoquer la vibration.

Nous avons mélangé jusqu'ici toutes les réponses qui évoquent le concept de vibration. Si nous regardons plus en détail, nous voyons que l'essentiel des réponses parlent de vibration(s) sans préciser à quel niveau le phénomène a lieu ou en impliquant explicitement la source comme cause de la ou des vibration(s). Il est cependant souvent difficile d'identifier grâce aux réponses des élèves le lieu qui est le siège de la vibration. Une expression comme "il faut que ça vibre" ne permet pas, par exemple, de lever l'ambiguïté. Par contre, il est possible de décompter les réponses qui parlent explicitement de vibrations *dans* le milieu (ou *du* milieu) : elles ne sont que 6 sur 41 avant et 11 sur 62 après. De plus, 4 élèves seulement invoquent la vibration de

constituants microscopiques du milieu alors qu'aucun ne le fait avant (ces 4 élèves ont suivi le contenu élaboré par le groupe SOC).

Prise en compte de la chaîne sonore Nous appelons "condition combinée" les réponses qui font appel à au moins deux éléments de la chaîne sonore. Ces réponses sont donc formulées par les élèves qui estiment qu'il faut plusieurs "choses" pour faire un son et qui tendent donc vers une approche plus globale. La quantité de ces réponses reste faible même si elle triple après enseignement : la proportion passe de 4 à 12%. L'essentiel des réponses après enseignement fait appel à un émetteur *et* un milieu (pas forcément formulé dans ces termes). L'appel à une chaîne complète ne dépasse pas 3% même après enseignement. La contrainte d'une condition unique demandée semble ici suffisamment forte pour limiter ce type de réponse, vue probablement comme l'expression de conditions multiples qui transgresseraient quelque peu la consigne. Par contre la seule mention d'un émetteur ou d'une source en général pour faire un son progresse fortement. De 2% des réponses avant enseignement, cette catégorie atteint 9% des réponses après enseignement. Ceci contribue à renforcer ce que nous disions au début de l'analyse de cette question : il y a une tendance forte à répondre en terme d'objets ou d'actions bien plus qu'en terme de phénomène. Les élèves ont pour une bonne part une vision très pragmatique et matérielle de la création sonore. Signalons enfin que quasiment aucun élève ne cite une condition purement perceptive (du type "il faut entendre quelque chose" ou "il faut qu'il y ait du bruit") correspondant au cadre conceptuel 1 "perception". Comme nous l'avons mentionné dans l'analyse *a priori* de la question, celle-ci ne met effectivement pas les élèves en situation de perception imaginée.

VIII.1.9.4 Comparaison SOC / non SOC

Absence d'information Comme pour d'autres questions, l'absence d'information est moins importante pour la population SOC après enseignement. Le taux d'absence de réponse est de 23% pour les deux populations avant enseignement, il concerne encore 10% des élèves n'ayant pas suivi la progression SOC après enseignement, mais plus que 2% des autres élèves. Le contenu élaboré par le groupe SOC semble donc donner davantage d'outils pour répondre à cette question. Ce premier point est mentionné dans le diagramme VIII.1-31 suivant qui résume aussi les comparaisons entre les deux populations étudiées pour les autres catégories d'analyse.

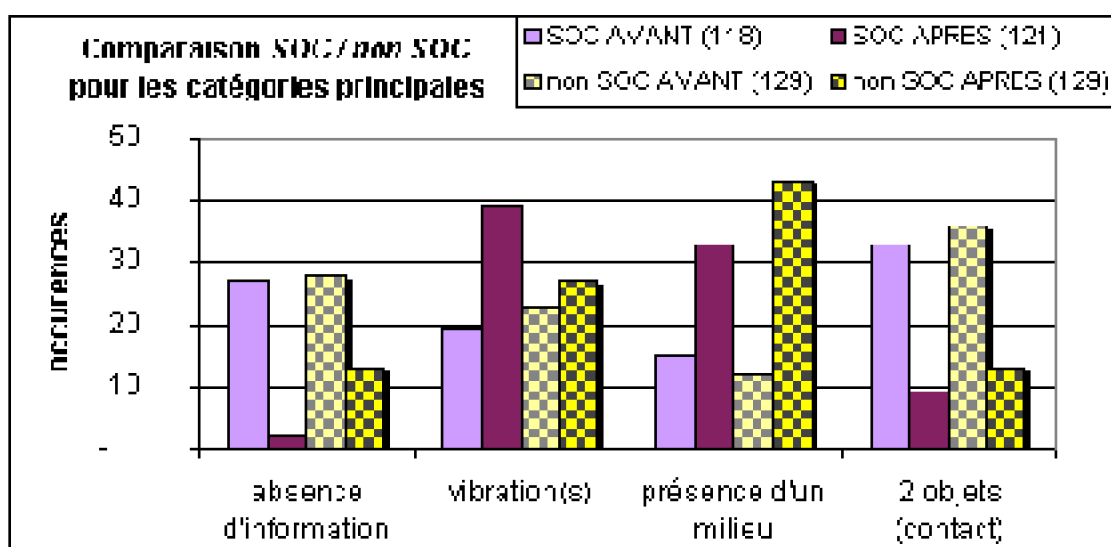


diagramme VIII.1-31 : question N, évolution des différents types de réponses selon la population

Vibration(s) La différence entre les deux populations au sujet des réponses évoquant le concept de vibration(s) n'est pas extrêmement nette même si la tendance que nous pouvions attendre et qui a déjà été mentionnée pour d'autres questions se confirme. Les résultats chiffrés (en occurrence) sont regroupés dans le tableau VIII.1-6 ci-dessous :

Tableau VIII.1-6: évolution de la mention de vibration(s) selon la population

	SOC	Non SOC
Avant	19 (16%, N=118)	23 (18%, N=129)
Après	39 (32%, N=121)	27 (21%, N=129)
	Évolution : +105%	Évolution : + 17%

Nous percevons ici l'effet de l'importance donnée à la vibration (et à son caractère nécessaire pour l'émission) par le contenu SOC, en particulier *via* du modèle de la vibration.

Milieu A l'inverse, il y a une légère tendance à une augmentation plus forte des réponses invoquant la nécessité du milieu de propagation pour la population non-SOC (tableau VIII.1-7).

Tableau VIII.1-7: évolution de la nécessité d'un milieu selon la population

	SOC	Non SOC
Avant	15 (13%, N=118)	12 (9%, N=129)
Après	33 (27%, N=121)	43 (33%, N=129)
	Évolution : +120%	Évolution : +260%

Il n'y a par contre pas de différence significative entre les deux populations au sujet de l'évolution de toutes les réponses citant une condition concernant le milieu en général. Cependant, et même si ceci n'implique que des petits nombres d'élèves, les réponses mentionnant le mouvement ou la mise en vibration de constituants microscopiques du milieu, inexistantes avant enseignement, sont quasi réservées à la population SOC après (7 contre 1).

Action ou présence de deux objets et condition combinée Il n'y a pas de différence significative entre les deux populations au sujet de la baisse des réponses qui font du choc ou de la présence de deux objets la condition demandée. De même, les nombres relativement faibles de réponses concernant les conditions combinées ne permettent pas d'observer de différences significatives.

VIII.1.9.5 Évolution lexicale

A partir de ce que nous avons observé au sujet des réponses fournies nous pouvons penser que certains termes de la liste *L* vont voir leur usage augmenter entre le début et la fin de l'enseignement :

vibration parce que le recours à ce concept augmente au cours de l'enseignement ;

propagation éventuellement parce que ce terme peut être associé à "milieu" assez facilement (c'est en tous les cas couramment le cas dans l'enseignement). Cette utilisation éventuelle de l'expression "milieu de propagation" sera d'ailleurs un indice de la provenance scolaire de l'augmentation de la condition "il faut un milieu".

les termes *émetteur* et *récepteur* (et ceux de même racine) peuvent aussi voir leur usage augmenter par réinvestissement de la chaîne sonore et du vocable utilisé dans le savoir à enseigner.

Avant de voir si ceci se confirme et, si tel est le cas, dans quelle mesure, étudions l'usage lexical global pour cette question. Les résultats généraux sont similaires à d'autres questions et mettent en particulier en évidence une assez faible utilisation des termes étudiés avant enseignement puis une assez forte progression. En effet, seuls 46 élèves (19%) utilisent un des mots avant enseignement (3 en citent 2), dont 30% de redoublants. Ils sont par contre 138 (55%) à le faire après (22 en citent 2). Ainsi, après enseignement, il n'y a qu'un peu plus de la moitié des élèves qui utilisent un des mots choisis.

Il y a un suivi global puisque quasiment trois quart des élèves ayant cité un mot avant le font aussi après enseignement.

Le diagramme VIII.1-32 ci-dessous résume les résultats concernant les mots les plus cités :

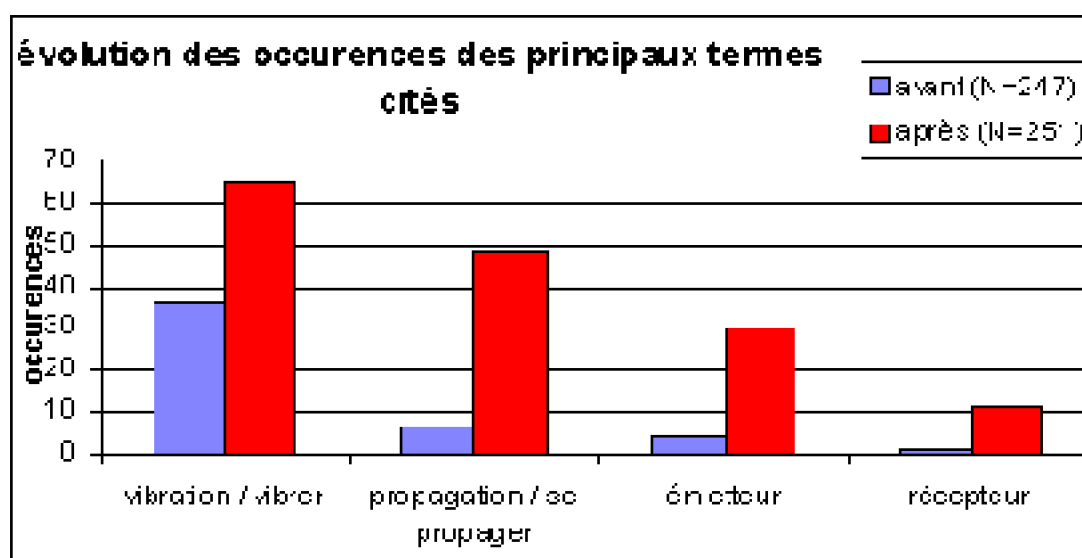


diagramme VIII.1-32 : question N, évolution lexicale

Comme prévu le terme *vibration* (*vibrer* compte pour très peu) double quasiment en occurrence : un quart des élèves le citent après enseignement. C'est évidemment la même proportion qui a été signalée pour les réponses en terme de vibration(s).

Le terme *propagation* voit également son utilisation fortement croître (après enseignement, *se propager* est 3 fois moins cité que *propagation*). Cette augmentation est à corrélérer au milieu de propagation invoqué comme condition, même si ces 20% d'utilisation sont inférieurs aux 30% de réponses qui se réfèrent au milieu.

Le terme *émetteur* émerge après enseignement comme produit lexical du savoir à enseigner. Le substantif est beaucoup plus cité que le verbe (quasiment absent) dans la mesure où il peut constituer la condition demandée. *Récepteur* ne bénéficie pas de la même progression dans la mesure où la question portait sur la condition pour "faire un son".

On remarquera, sans s'en étonner, que les concepts permettant de caractériser les sons (*aigu*, *grave*, *fréquence*, *volume*, *amplitude*) sont quasiment inexistants ici.

Regardons maintenant les éventuelles différences entre les deux populations étudiées :

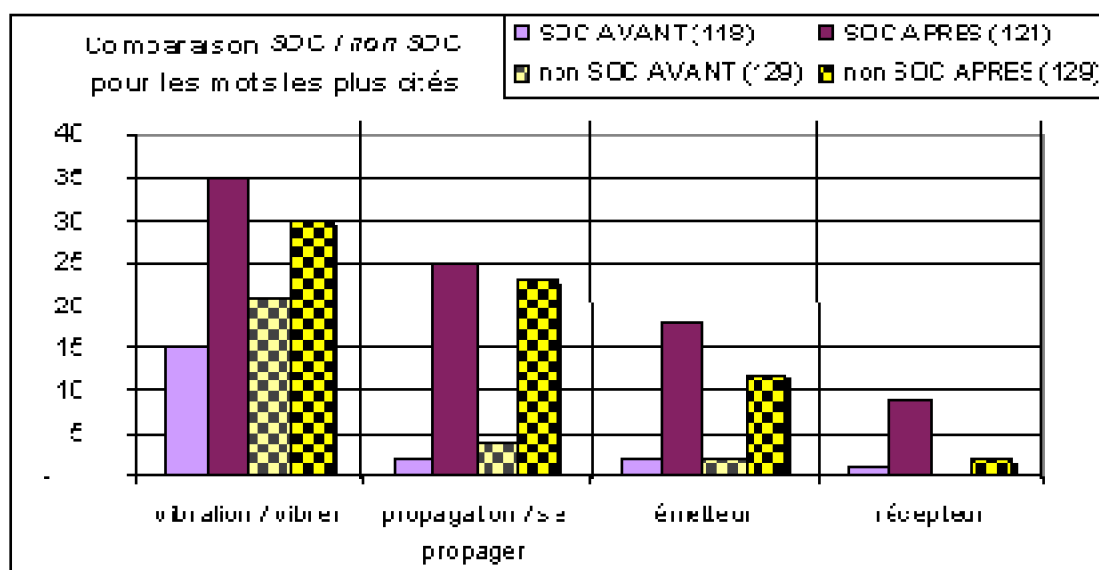


diagramme VIII.1-33 : question N, évolution lexicale selon la population

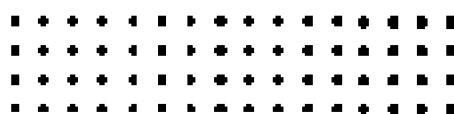
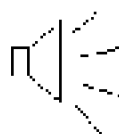
La différence semble logiquement significative pour *vibration* (voir plus haut). Pour le reste nous ne pouvons qu'observer des tendances qui demanderaient à être confirmées par des observations d'échantillons plus importants.

VIII.1.10 Question Q

VIII.1.10.1 Énoncé

On suppose que, très schématiquement, quand il n'y a aucun son, les molécules qui composent l'air sont rangées comme ci-dessous (elles sont énormément grossies).

Puis si un haut-parleur émet un son dans l'air en permanence, décrivez ce qu'il se passe au niveau des molécules durant un temps assez long, en complétant ou refaisant le schéma ci-dessous :



à compléter avec par, en-dessous de

Si nécessaire expliquez :

VIII.1.10.2 Présentation

Cette question est la seule qui fait intervenir explicitement un point de vue microscopique. Les résultats précédents ont permis d'illustrer que l'appel à ce type de représentation n'est pas facilement effectué par les élèves, et ceci même pour des questions (question N par exemple au sujet d'une "condition obligatoire pour faire un son") où il pourrait s'avérer pertinent du point de vue de la physique, de part son degré de généralité. Rappelons le nombre de réponses appelant une analyse du point de vue microscopique pour les questions où ce point de vue apparaît :

Question E (son émis plus fort, va-t-il plus vite ?) : 4 élèves (1,5%) ;

Question I (qu'est-ce qui fait qu'on entend un son dans quatre situations différentes) : aucun élève avant enseignement, de 9 à 13 élèves (4% à 5%) après enseignement selon la situation ;

Question L (ambulance qui se déplace) : 0% avant enseignement, 1% après ;

Question N : aucun élève avant enseignement, 11 élèves (4%) après ;

Question R (voir plus loin) : 3 élèves avant, 4 élèves après ;

De plus, nous avons noté que les élèves concernés ont généralement suivi la progression élaborée par le groupe SOC.

Rappelons à ce stade que le groupe SOC insiste sur l'interprétation microscopique de la propagation du son. Il se démarque ainsi quelque peu des consignes officielles surtout depuis que celles-ci ont été revues (cf. chapitre II). Un modèle microscopique est proposé et utilisé pour interpréter certaines situations expérimentales (cf. chapitre VI, partie B). Cette utilisation du modèle reste difficile dans la mesure où, pour le faire fonctionner de façon fructueuse, l'élève doit pouvoir passer d'un modèle écrit en langage naturel et accompagné de schémas à une représentation animée des objets et des événements.

Nous n'avons pas connaissance de ce qui a été enseigné à ce sujet dans les classes n'ayant pas suivi la progression SOC. Nous ne pouvons pas, en particulier, affirmer que dans ces classes les allègements évoqués ont été suivis (il n'y a aucune obligation à les suivre, ces allègements sont *proposés*).

La question est, comme dans le modèle proposé par le groupe SOC, formulée en langage naturel et à l'aide d'un schéma sur lequel les élèves sont invités à travailler. Nous avons de bonnes raisons de penser que ce schéma est un mode de représentation avec lequel les élèves ayant suivi la progression SOC sont relativement familiers.

Nous avons conscience de l'aspect très réducteur de la présentation qui est faite, et qui peut même aller contre certaines représentations qu'ont les élèves sur les constituants microscopiques d'un gaz. En particulier, il peut paraître surprenant d'avoir ranger en ordre les molécules. Ceci présente l'avantage de rendre les modifications que vont mentionner les élèves plus visibles. Mais ce choix peut induire la représentation dialectique : pour modifier quelque chose à cette disposition en ordre, le plus simple est de représenter les particules en désordre. Il pourrait être utile de reposer cette question avec des particules *déjà* en désordre. Par ailleurs nous avons utilisé le terme "molécules" alors qu'il aurait été plus correct (en tous les cas plus en accord avec les modèles proposés par la physique de parler de particules). Enfin, nous avons conscience de mélanger dans cette représentation des échelles qui ne sont pas du tout les mêmes. Le haut-parleur est schématisé à côté de particules (dont nous précisons qu'elles sont énormément grossies)

alors que ces "objets" ne sont pas de même nature. Il semble cependant, au vu des réponses, que ceci ne gêne pas la compréhension de la question. Le haut-parleur semble effectivement vu comme le moyen pratique de représenter un émetteur de façon iconique.

Une difficulté supplémentaire dans l'élaboration de la question provenait du souci de faire décrire, par un nouveau schéma ou une modification de celui fourni, un phénomène qui, pour être correctement décrit, doit être considéré sur une certaine durée. Nous précisons en effet que le haut-parleur émet un son en permanence pour que les phénomènes imaginés soient stationnaires. Pour rendre la description dynamique, nous demandions alors de décrire "ce qu'il se passe au niveau des molécules durant un temps assez long". Les élèves pouvaient :

• d'une part représenter l'état de l'organisation spatiale des particules à un instant donné une fois le son installé ;

• d'autre part indiquer par des marqueurs dynamiques, tels que des flèches, l'évolution des événements subis par les particules.

La question n'est donc pas d'une compréhension simple et elle nécessite une réflexion relativement importante. Néanmoins, l'élève n'a pas *a priori* besoin de faire des aller-retours entre monde des modèles et mondes des objets et des événements pour répondre. Il peut se contenter de rester dans le monde des modèles (en l'occurrence microscopique).

L'explication demandée, quand elle est fournie, permet d'effectuer un codage plus juste de ce que le sujet a voulu représenter (pour expliquer en particulier ce qui se passe dans le temps).

Nous avons déjà quelques éléments d'analyse au sujet de cette question, provenant de la littérature en didactique. Les études a ce sujet ont essentiellement été menées au niveau universitaire. Mais nous avons vu que ce point de vue a rarement été étudié avec des sujets de début de lycée. Mentionnons cependant le travail de Varaine et Treillard (1998) qui, en proposant quasiment la même question à un petit échantillon de seconde avant enseignement, permet d'obtenir quelques idées sur la diversité des réponses graphiques (ce qui a été utile pour finaliser notre grille de codage), mais rien de très significatif. A ce niveau d'étude, nous pouvons nous attendre à observer, en plus des conceptions classiques connues pour les étudiants, soit des conceptions pas encore mises en évidence, soit des conceptions transférées de conceptions macroscopiques. Par exemple la conception qui consiste à penser que le son s'accompagne d'un courant d'air pourra être ici traduite par un déplacement d'ensemble des particules de gauche à droite.

Il sera bien sûr intéressant d'observer l'effet de l'enseignement sur les réponses. La vibration des particules sera-t-elle invoquée ? Dans ce cas, quel type de vibration ? Y aura-t-il mention de zones comprimées et dilatées ?

La diversité des réponses est telle que nous avons été obligé, pour cette question plus encore que pour les autres, de réajuster la grille d'analyse au fur et à mesure des

dépouillements des versions préliminaires. En particulier nous verrons que même si elles ne sont pas représentatives d'un grand nombre d'élèves, certaines descriptions consistent à organiser les particules selon des motifs bien particuliers et très variés. Ces réponses sont cependant riches d'enseignement sur le type d'interférence qui peut exister entre différents modes de représentations autour d'un phénomène donné.

Le cadre conceptuel activé ici est de fait le n°2 (son hors source, dans le milieu). Nous pourrions cependant, lorsque c'est possible et en observant les mouvements attribués aux particules, analyser plus précisément la répartition des réponses selon les deux cadres secondaires déjà mentionnés : le son en déplacement d'un point à un autre (CC2a) ou le son qui s'éparpille et/ou rayonne (CC2b).

Remarque sur le codage : Au cas où l'explication ne semble pas cohérente avec le schéma (ou du moins de l'éclairer pas du tout), si elle n'est pas claire, nous avons privilégié le schéma. Par contre, dans les cas où le schéma est statique alors que l'explication implique du dynamisme, nous avons privilégié l'explication en langage naturel.

VIII.1.10.3 Résultats essentiels

Des élèves très démunis avant enseignement 34% des élèves cochent la case "je ne sais pas" avant enseignement. Il ne sont que 2% à ne pas donner de réponse. On a donc plus d'un tiers des élèves qui affirment ne pas savoir répondre avant enseignement. Ce taux place cette question parmi celles qui laissent les élèves les plus démunis. Ceci peut signifier que ces élèves ne se sont jamais posé la question et/ou qu'ils estiment ne pas avoir les moyens d'y répondre (ni en restant au niveau du modèle ni en s'appuyant sur des situations empiriques). Ce pourcentage chute à 8% après enseignement (9,5% si on compte les non-réponses), avec une constance individuelle assez forte puisque les trois quarts de ces 8% affirmaient déjà ne pas savoir avant enseignement. Cette baisse permet de dire que l'enseignement apporte sur ce sujet des outils conceptuels pour répondre, ou pour tout au moins être capable de "manipuler" des objets du modèle. Ces pourcentages ainsi que ceux concernant les autres grandes tendances détaillées par la suite sont présentés dans le diagramme VIII.1-34 suivant :

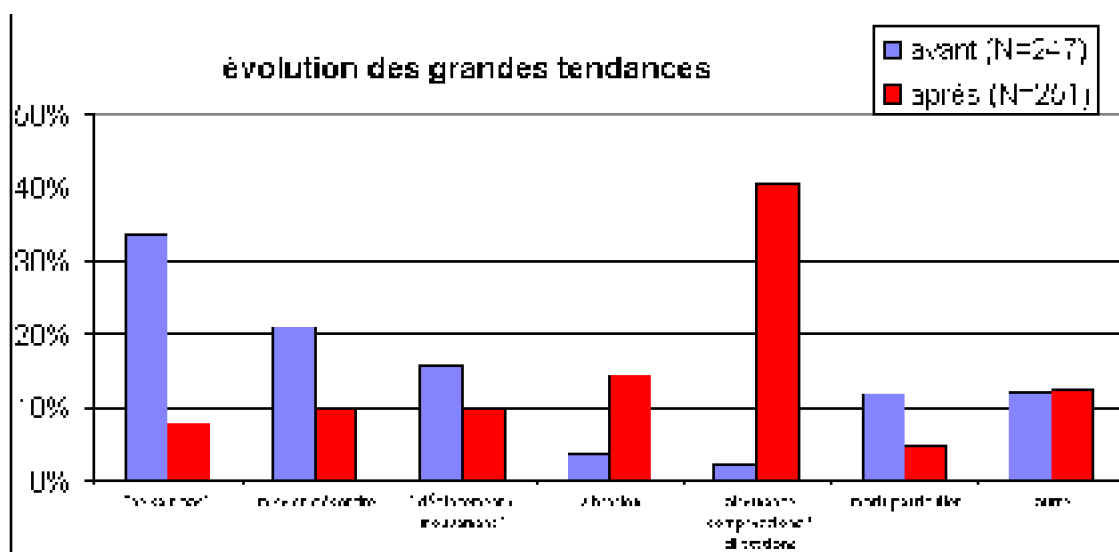


diagramme VIII.1-34 : question Q, évolution des différents types de questions

Une description minimaliste avant enseignement : la mise en désordre des molécules

Plus d'un cinquième (21%) des élèves mentionnent ou redessinent (le plus souvent) les particules en désordre. Nous considérons que les particules sont dessinées en désordre lorsqu'il n'y a aucun motif repérable dans leur organisation spatiale, y compris lorsqu'elles semblent dispersées sur une zone plus grande que la zone initiale. Comme nous l'avons déjà dit, le fort taux de réponses de ce type peut s'expliquer par la disposition très ordonnée des particules dans l'énoncé. La première idée qui peut ainsi venir à l'esprit est de rompre cet ordre, surtout si les élèves ont une représentation désordonnée et agitée des particules d'un gaz (ce peut être le cas pour certains, le sujet a été abordé au collège). Ce type de réponse est donc fortement contraint pas le choix de la représentation initiale et permet donc seulement de conclure que ces élèves pensent que le son va perturber l'ordre des molécules, en les agitant. Ces réponses sont beaucoup moins fréquentes après enseignement (10%). Plus exactement, si l'on retrouve l'idée de désordre des molécules, celle-ci est affinée et peut être accompagnée d'une autre idée sur le comportement des particules (en particulier le désordre peut s'accompagner d'un éparpillement et d'un déplacement vers la droite ou sur le côté). On constate donc une décroissance (ou au pire un aménagement) de l'idée "simple" de désordre. Regardons justement la quantité et l'évolution des réponses qui évoquent un éparpillement sur les côtés (accompagné éventuellement d'un déplacement des particules vers la droite). Ces réponses sont formulées par 5% des élèves avant enseignement et seulement par 3% après, ce qui les rend relativement confidentielles. Signalons que ces points de vue se rapprochent de ceux qui peuvent être induits par le cadre conceptuel 2b (le son se répandant de façon radiale). Nous verrons que d'autres types de réponses (ce sera un des motifs particulier, relativement peu choisi également) peuvent s'inscrire dans ce cadre conceptuel.

Les descriptions des déplacement ou des mouvements des particules.

— *Mouvements hors vibration* Nous regroupons ici toutes les réponses qui décrivent un déplacement d'ensemble des particules ou le mouvement de quelques-unes (y compris parfois une seule d'entre elles), sans évoquer de vibrations ou de mouvements d'aller-retour des particules. L'ensemble de ces réponses représente 16% des réponses avant enseignement et 10% après. Les deux réponses typiques les plus courantes sont :

— déplacement des particules vers la droite (déplacement d'ensemble). Cette description est le pendant microscopique du raisonnement en "courant d'air". Ces réponses sont citées dans 6,5% des cas avant et dans 4% après. Une variante citée 4 fois avant enseignement ne met en mouvement que les particules dans l'axe du haut-parleur ;

— déplacement ou mouvement des particules sans autre précision et *sans schéma*. Cette réponse est donc extrêmement peu précise et aurait très bien pu être classée dans certains cas dans la catégorie "désordre" en étant précisée un peu plus (on ne sait pas si c'est un mouvement d'ensemble ou un mouvement local). Cette seule évocation du mouvement des particules représente assez peu de réponses (4,5% avant, 1% avant).

— Les autres descriptions ne dépassent jamais 7 occurrences, ce qui peut paraître surprenant, en particulier pour la réponse qui évoque le mouvement en relation avec les chocs des particules (5 occurrences avant enseignement, 7 après) dont on donne deux exemples ci-dessous (Figure VIII.1-1).

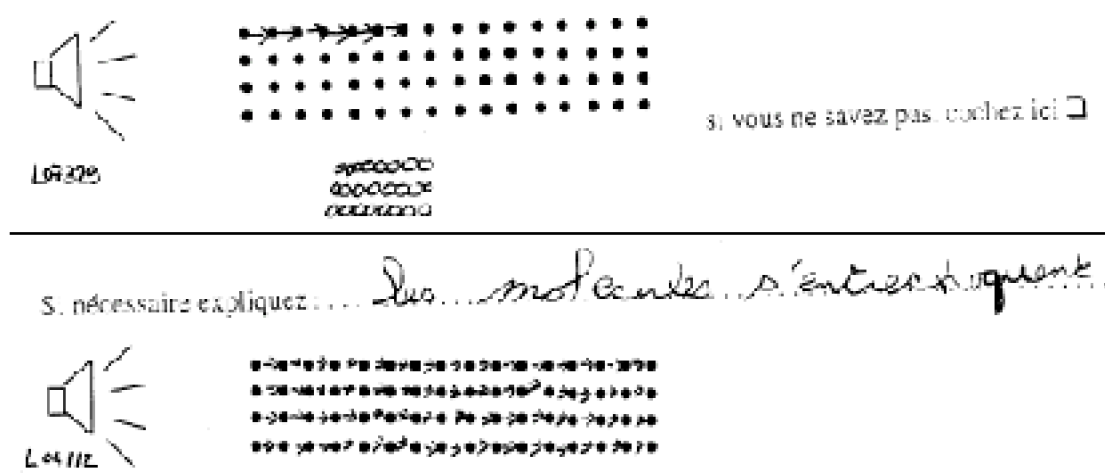


Figure VIII.1-1 : exemples (assez rares) de schéma indiquant un mouvement vers la droite résultant de chocs

On voit donc que ces réponses, même si elles peuvent paraître assez différentes les unes des autres ne font que mentionner le mouvement des particules sans évoquer d'aller-retours et ne sont finalement pas si éloignées des réponses ne mentionnant que le désordre. Elles sont caractérisées par une description des particules dans leur ensemble : toutes les particules (ou un groupe de particules) ont un mouvement dans

un sens donné et se comportent globalement de la même façon à un instant donné.

La vibration des particules peu citée mais en progression Le phénomène de vibration attribué aux particules n'est pas facile à décrire dans la mesure où au cours du temps, le changement de sens des particules doit être décrit. De plus, dans certaines descriptions, les particules n'ont pas toutes un déplacement synchrone par rapport aux autres. Au total le pourcentage d'élèves mentionnant la vibration des particules passe de 4% à 14%, les redoublants contribuant pour moitié avant enseignement. La vibration des particules est souvent évoquée dans le savoir à enseigner et c'est en tout cas un élément essentiel du modèle que le groupe SOC propose à ce sujet. La mention des vibrations de particules peut donc provenir de différentes "observations" faites durant le cours de sciences physique :

— le transfert aux particules du comportement de l'émetteur : il est alors possible d'imaginer par exemple des mouvements vibratoires des particules dans leur ensemble (toutes les particules en phase) ;

— le transfert aux particules du comportement de certains "objets" utilisés pour illustrer le phénomène de propagation. Dans ce cas, comme la plupart des analogies macroscopiques (cf. chapitres II et III) sont des ondes transversales (vagues, corde de Melde, échelle de perroquet...), la vibration des particules serait plutôt verticale. Nous allons voir que les vibrations verticales sont quasiment inexistantes, ce qui laisse penser que ce genre de transfert n'a pas lieu. Par contre, le recours à des analogies peut avoir des effets autres que la vibration verticale, comme le montre l'exemple ci-dessous (figure VIII.1-2) ;

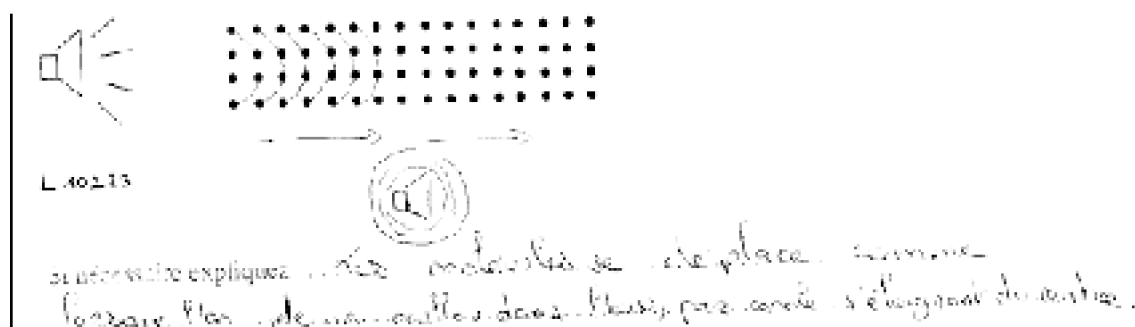


figure VIII.1-2 : question Q, exemple de lien explicite avec les ondes à la surface de l'eau

le transfert aux particules d'événements macroscopiques illustrant le non déplacement global de matière (expérience de la bougie par exemple) : vibration d'ensemble ou individuelle des particules ;

l'utilisation du modèle microscopique proposé par l'enseignement (celui du groupe SOC ou éventuellement un autre). Il pourra par exemple dans ces conditions être fait mention

de chocs, ou de zones comprimées et dilatées. Avec les données dont nous disposons, nous n'avons pas la possibilité de connaître le type de processus qui conduit l'élève à évoquer la vibration des particules. Nous pouvons néanmoins détailler quelque peu la proportion relative de certains types de réponses :

seulement 6 élèves avant enseignement (dont 1 redoublant) et 2 après se contentent d'écrire en langage naturel que les molécules *vibrent* sans faire de schéma. On voit donc que pour indiquer la vibration, le schéma est un recours pratique, même si la description d'un phénomène forcément dynamique n'est pas toujours évidente et oblige à quelques conventions sémiotiques que nous avons tenté de prendre en compte au mieux ;

un seul élève après enseignement dessine des vibrations verticales. Tous les autres schématisent des vibrations horizontales ;

3 élèves *redoublants* schématisent des vibrations horizontales avant enseignement. Nous donnons un exemple ci-dessous ;

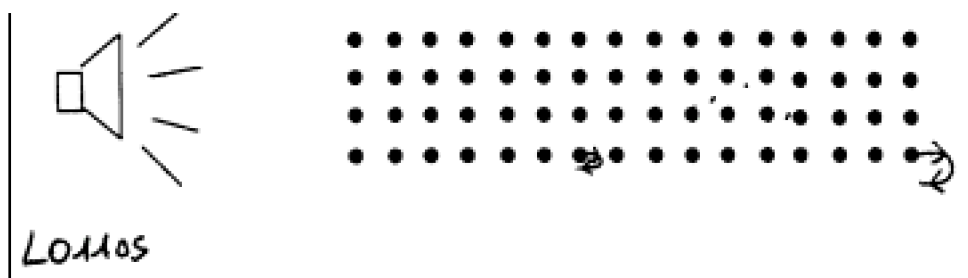


figure VIII.1-3 : question Q, exemple de représentation de la vibration horizontale des particules

après enseignement, ils sont 30 (12%) à donner un mouvement de vibration horizontale à chaque particule, dont environ la moitié explicitent les chocs qui accompagnent ce mouvement ;

enfin, 3 élèves dessinent après enseignement un mouvement de vibration sur l'ensemble des particules. Ceci peut être le signe d'un mouvement de vibration d'ensemble (et synchrone). On donne un exemple ci-dessous :

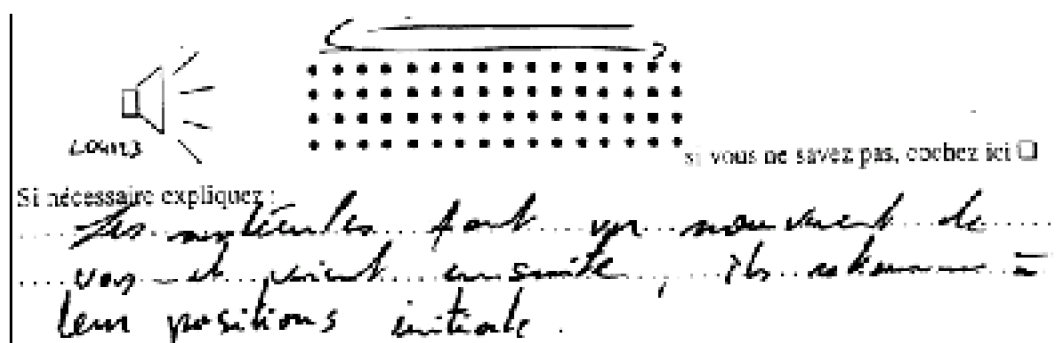


figure VIII.1-4 : question Q, exemple de représentation d'une vibration d'ensemble

On voit donc que l'essentiel de ces réponses après enseignement concerne des vibrations attribuées aux particules, horizontales, avec ou sans chocs. Nous en donnons deux exemples ci-dessous (figure VIII.1-5) :

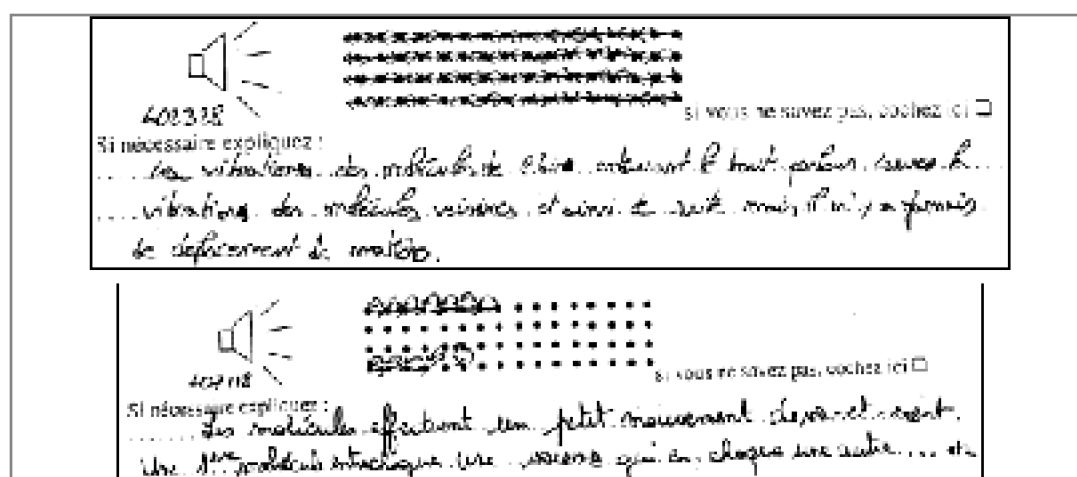


figure VIII.1-5 : question Q, exemples de représentations des vibrations horizontales des particules

Si la progression des réponses en terme de vibration est importante (de 4% à 14%), il est en revanche assez surprenant de constater le relativement faible nombre d'élèves (36) donnant ce type de mouvement (et/ou le citant) après enseignement. Rappelons en effet que pour des questions concernant la création sonore ou la nature du son (I et N en particulier) le concept de vibration est invoqué plus largement.

Nous allons voir qu'il est cependant possible d'expliquer en partie ce point par la présence importante après enseignement d'un autre type de réponse.

L'alternance de zones comprimées et dilatées : une progression majeure. L'utilisation d'un modèle, ou de façon plus large du contenu enseigné (la représentation a pu être rencontré dans le livre de classe), se manifeste surtout dans la représentation, largement prédominante après enseignement de l'alternance de zones où les "tranches" de molécules sont resserrées et de zones où elles le sont moins. Évidemment, les dessins sont plus ou moins précis, plus ou moins explicites, mais nous avons regroupé

toutes les réponses allant dans ce sens. Au total, si ce point de vue est rare avant enseignement (5 élèves dont 4 redoublants !), il devient largement répandu après enseignement puisqu'il est partagé par 102 élèves (41%). C'est donc ici une progression exceptionnelle et ceci constitue le fait majeur concernant cette question.

Bien entendu, ce type de représentation n'est pas forcément révélateur d'une compréhension de ce qu'il se passe dynamiquement. Rien n'indique en particulier que tous les élèves répondant de cette façon pensent que les particules effectuent des mouvements d'aller-retour. Nous avons cependant davantage d'informations pour certains élèves qui, en plus du dessin, explicitent leur point de vue soit en précisant par exemple que le déplacement du motif se fait sans déplacement de matière et/ou de proche en proche. Nous avons compté ces réponses plus explicites qui dénotent généralement une certaine compréhension du phénomène : nous obtenons (après enseignement) 17 réponses de ce type (sur 102). Nous donnons ci-après (figure VIII.1-6) quelques exemples qui illustrent d'une part la variété des représentations utilisées pour cette idée, d'autre part la présence ou non de commentaires.

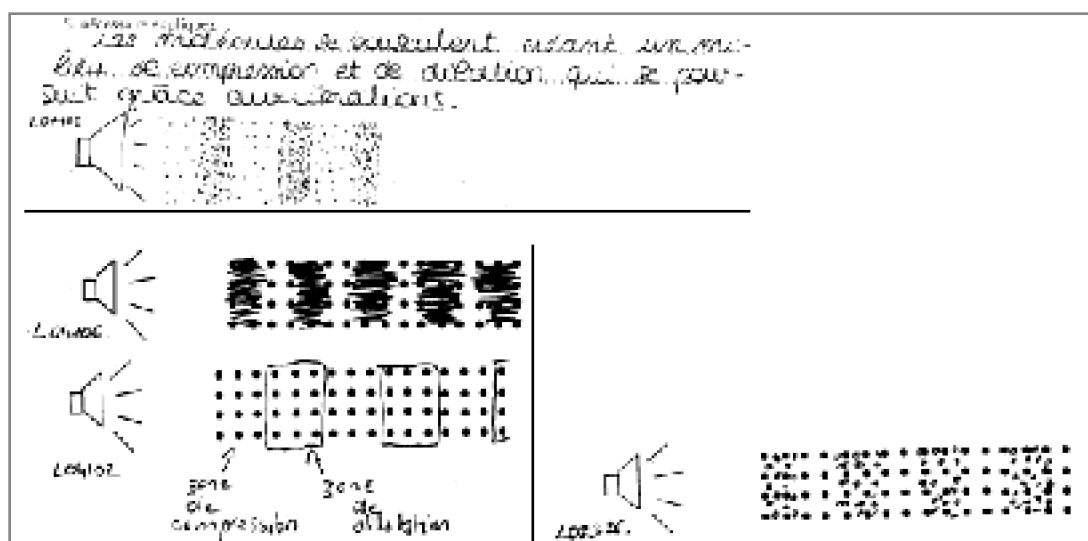


figure VIII.1-6 : question Q, exemples de représentation de zones comprimées et dilatées

Signalons enfin qu'on ne peut rien dire de spécifique au sujet des types de réponses fournies avant enseignement par les 102 élèves répondant en terme de compressions par rapport au reste de la population. Ils se répartissent comme les autres avant enseignement entre "je ne sais pas" (38%) et "particules en désordre" (19%).

Les motifs dessinés. Nous signalons également certaines réponses, que nous pouvions attendre a priori, qui consistent à représenter les particules dans une configuration particulière. Les représentations de motifs particuliers dont nous donnons quelques exemples ci-après, tout type confondu, chutent de 12% avant à 5% des réponses après enseignement. Ceci n'est pas étonnant dans la mesure où ces réponses sont souvent l'expression de l'imagination des élèves, imagination qui s'exerce mieux avant enseignement. Cependant, certains motifs révèlent des conceptions initiales probablement assez générales sur ce qu'est le son et sur la façon dont il se propage.

—
Motif concentrique, type "front d'onde sphérique"

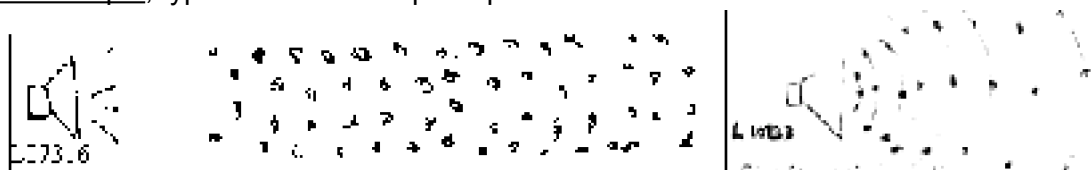


figure VIII.1-7 : question Q, exemple de motif concentrique

Il est intéressant de noter que cette représentation correspond un aménagement "particulaire" de la représentation "en surface d'onde" que nous avons évoquée au chapitre I, de même que la suivante est une accommodation de la représentation particulaire à la représentation radiale déjà évoquée.

—
Motif radial



figure VIII.1-8 : question Q, exemple de motif radial

—
Motif sinusoïdal Cette représentation assez commune du son est ici importée dans le cas microscopique.

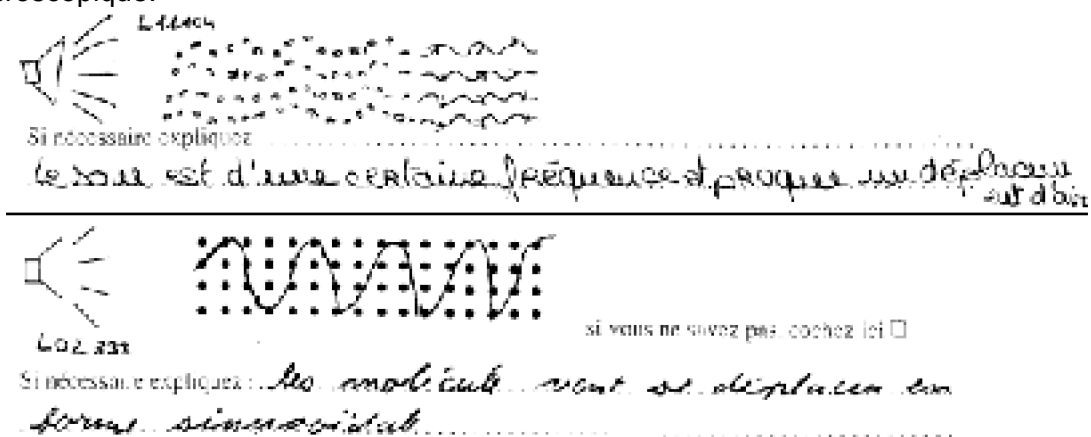


figure VIII.1-9 : question Q, exemple de motif sinusoïdal

—
Particules qui s'écartent pour laisser passer le son On retrouve ici un aspect matériel du son qui semble pousser les particules pour pouvoir passer.

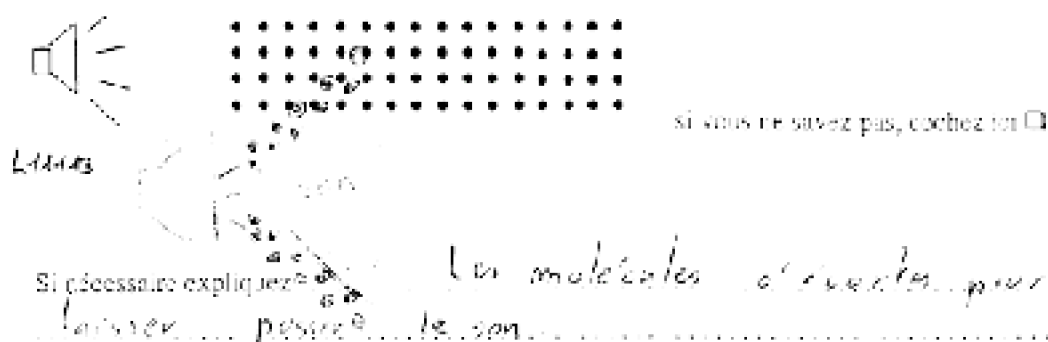


figure VIII.1-10 : question Q, exemple de schéma représentant le son poussant les particules sur le côté

Des réponses très marginales Citons enfin les points de vue qui ne sont quasiment pas cités :

- le son qui passerait à travers les particules, ces dernières étant passives (5 avant)
- changement du nombre de particules (1 avant, 3 après)
- changement de la taille des particules (1 après)

VIII.1.10.4 Comparaison SOC / non SOC

Comme nous l'avons déjà laissé entendre à plusieurs reprises, nous pouvons nous attendre à des différences importantes de l'évolution des réponses des deux populations étudiées.

Les différences mentionnées dans le diagramme VIII.1-35 ci-dessous sont suffisamment flagrantes pour avoir un bon aperçu de ces différences. Nous les détaillons et analysons ci-après.

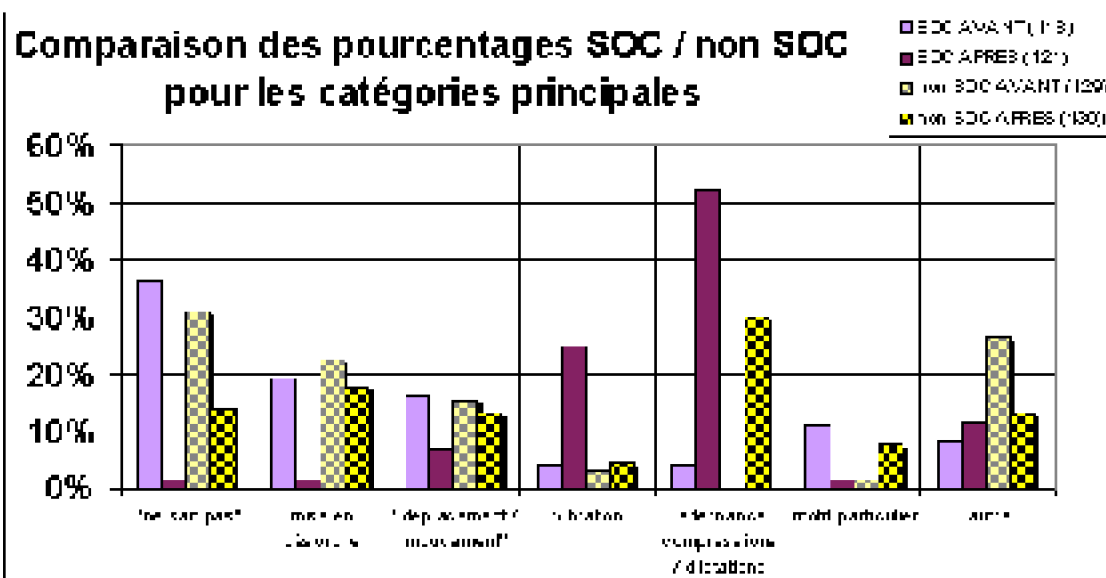


diagramme VIII.1-35 : question Q, évolution des différents types de réponses selon la population

Trois catégories baissent bien plus nettement pour la population SOC :

il n'y a quasiment plus d'élèves (2) de la population SOC qui répond "je ne sais pas" après enseignement, alors qu'ils sont encore plus de 10% dans l'autre population. On voit donc que vis-à-vis du problème posé, les élèves ayant utilisé le modèle microscopique proposé par le groupe SOC sont moins démunis. La situation et la représentation proposées leur semblent plus familières qu'aux autres élèves et l'enseignement leur donne les moyens de proposer une solution ;

ce que proposent ces élèves de la population SOC est relativement plus élaboré. En effet seuls 2 d'entre eux mentionnent ou redessinent des particules en désordre alors qu'il y a 18 élèves "non SOC" à le faire (pour 29 "non SOC" et 23 "SOC" avant enseignement) ;

enfin, il n'y a quasiment pas de baisse du nombre d'élèves de la population non SOC qui répondent en terme de déplacement ou de mouvement des particules alors que dans le même temps celui de la population SOC passent de 19 à 8 (dont 6 mentionnant les déplacements et les chocs) ;

Ces différences sont donc suffisamment significatives pour pouvoir observer des évolutions symétriques dans les catégories prenant de l'importance. On notera ainsi les deux faits majeurs suivants :

l'augmentation des réponses en termes de vibration des molécules (on pourrait presque dire "l'apparition" vu leur faible nombre avant enseignement) n'a lieu de façon

significative que pour la population SOC (un quart des réponses de cette population après enseignement). Nous retrouvons là l'importance déjà rencontrée sur d'autres questions du concept de vibration pour cette population. Nous voyons aussi que ces élèves sont capables de faire fonctionner le modèle microscopique fourni en classe pour un problème faisant parti du domaine de fonctionnement de ce modèle ;

la différence est également très nette pour la représentation des zones plus ou moins comprimées, qui contrairement aux réponses en terme de vibration n'est pas forcément une description dynamique mais une "photo" de l'état microscopique du milieu à un moment donné. Le fait que 39 élèves des classes ne l'ayant pas suivi la progression SOC adoptent ce point de vue confirme que cette représentation n'est pas présente *que* dans le contenu élaboré par le groupe SOC. Il est donc clair que ce type de représentation a été fournie aussi dans les classes non SOC (au moins dans certaines d'entre elles), par un moyen ou un autre : description par l'enseignant, livre scolaire. Rappelons que cette représentation, donnée seule, ne permet pas de révéler une compression du phénomène dans sa dynamique : il peut juste s'agir d'une reproduction d'un savoir scolaire appris (y compris pour la population SOC). Si donc, cette représentation n'est pas utilisée que par les élèves de la population SOC, elle est significativement plus importante pour eux après enseignement. Ceci valide l'utilité et la capacité à utiliser le modèle microscopique proposé. Mais surtout, ce ne sont quasiment que des élèves "SOC" (14 sur 17) qui ajoutent un commentaire en langage naturel à leur dessin. Comme déjà mentionné, ce commentaire ajoute la notion de déplacement de proche en proche et/ou sans déplacement de matière (pas forcément dans ces termes). Ces commentaires peuvent aussi être la marque d'un savoir scolaire récité mais nous estimons qu'ils permettent de révéler une compréhension plus importante de ce qui se passe. Remarquons enfin que le nombre de réponses représentant des motifs géométriques particuliers (autre que compression) diminue pour la population SOC alors qu'elle augmente pour l'autre population. Ceci peut provenir d'une part de l'utilisation dans un cas d'un modèle explicite (population SOC) et précis d'autre part d'exploitation plus "hasardeuses" d'éventuelles représentations ou modèles microscopiques (population non SOC).

VIII.1.11 Question S

VIII.1.11.1 Énoncé

Lorsqu'on entend un son, il y a quelque chose qui vibre (un objet ou une partie d'un objet).

A votre avis (cochez une des deux cases), si le son devient plus aigu, c'est qu'il s'est passée quelque chose :

entre ce qui vibre et l'oreille précisez alors ce qui a changé :

ou au niveau de la vibration précisez alors en quoi la vibration est modifiée :
.

VIII.1.11.2 Présentation

Cette question est la dernière du questionnaire avant enseignement, l'avant-dernière après enseignement. Elle doit en effet intervenir à la fin du questionnaire car elle évoque explicitement le lien entre un son et la vibration de la source qui en est à l'origine. Elle ne doit donc pas fausser les réponses à d'autres questions dont c'était l'objet.

Cette question invite à modéliser puisque l'élève doit faire le lien entre un événement sonore *a priori* perceptible (plus aigu) et un phénomène mécanique. Il doit en plus dire où se déroule ce phénomène. La résolution du problème présenté peut être *a priori* effectuée en fin d'enseignement, dans la mesure où le savoir à enseigner fournit théoriquement les outils pour répondre. Mais il est bien évident que les réponses n'évoqueront pas forcément des phénomènes généraux mais des événements contingents à une situation imaginée par l'élève pour répondre à la question. Un des enjeux de cette question est donc de voir s'il y a effectivement modélisation, et dans ce cas quel type de modélisation. Quoi qu'il en soit, les requêtes de précision de la réponse demandent de décrire des modifications ; en particulier, décrire la vibration peut apparaître plus facile après enseignement puisque les élèves disposeront de concepts scientifiques pour le faire.

Cette modélisation doit être effectuée sur une situation qui n'est pas vraiment familière (quand il y a un son quelque chose vibre) mais dont le contexte, même s'il est sommaire et pas matériel, est donné (on entend un son qui devient plus aigu). La question est posée dans des termes quotidiens. Le terme le plus "scientifique" utilisé est le terme *vibration* mais l'analyse d'autres questions (en particulier la question I) a montré que le terme est connu et peut même être utilisé par un grand nombre d'élèves avant enseignement. Ceci justifie qu'on puisse poser également la question avant enseignement.

Le sens commun tend à localiser la cause des événements sonores à la source. En effet, le point de vue quotidien tend à négliger le milieu dans la relation de cause à effet liant la perception et les événements. La cause de ce qu'on perçoit est d'abord l'objet source et donc les changements de sensation auditive trouvent naturellement leur source également à ce niveau. (voir pour plus de détails à ce sujet le chapitre I et en particulier la notion de transparence du milieu de Casati et Dokic (1995)).

Le savoir à enseigner permet également de répondre à cette question en invoquant plutôt une modification au niveau de la source. Dans ce cas, le contenu d'enseignement rend explicite le lien entre l'évolution croissante de la hauteur du son (plus aigu) et la fréquence de vibration de la source (ce qui en terme d'événement peut se traduire, comme nous le verrons, par quelque chose du type "ça vibre plus rapidement" ou "ça va plus vite"). Il n'est pas non plus aberrant, selon le savoir à enseigner, d'affirmer que les deux options proposées ne sont pas exclusives. En effet, une modification du comportement de la source a des conséquences sur ce qui se passe entre la source et l'oreille (dans le milieu de propagation). Et il est alors légitime de s'appuyer sur le savoir à

enseigner pour évoquer l'augmentation de la fréquence de vibration des particules de l'air, voire même, à un niveau de modélisation plus poussé, de la diminution de la longueur d'onde du son dans le milieu (ce que pourrait avancer le physicien). Ainsi, si le savoir à enseigner a tendance à donner une importante prédominance à la causalité "modifications au niveau de la source => évolutions perceptives", ceci n'exclut pas le discours sur la modification de ce qui se passe dans le milieu. Ces deux options rendent compte du niveau de modélisation adopté pour répondre, et on demande ici à l'élève de choisir laquelle lui paraît être en jeu dans le fait que le son devienne plus aigu.

Le savoir à enseigner fournit donc des outils relativement précis et utiles pour répondre à cette question, ce qui laisse envisager une évolution significative des réponses.

L'analyse des réponses est aussi le moyen d'observer dans quel cadre conceptuel s'effectue la réponse. En effet, il y a une correspondance relativement nette entre le cadre conceptuel 3 "source, cause" et la réponse correspondant à la deuxième case cochée alors que le cadre conceptuel 2 "trajet, son hors source" correspond à la première case.

Remarque: le codage adopté ne pouvait pas être le même selon la case cochée, ce qui est suffisamment exceptionnel dans l'analyse des réponses pour être signalé.

VIII.1.11.3 Résultats essentiels

Quelle signification du taux de réponses ? Le taux d'absence d'information est de 20% avant enseignement. 12% des élèves affirment ne pas savoir répondre, 4,5% ne donnent pas de réponse et 3% affirment ne pas comprendre la question. Ce dernier point est assez important puisque seuls 8 élèves explicitent une non compréhension ce qui confirme que globalement, la question est vue comme une question à laquelle il est *a priori* possible de répondre. Pour une question qui peut être jugée difficile de part le type d'activité qu'elle nécessite, la proportion d'un cinquième d'élèves ne cochant aucune des deux cases avant enseignement est plutôt faible. Il serait de plus prudent de minimiser ce chiffre dans la mesure où certaines non réponses ou certains "je ne sais pas" (sans qu'on puisse les quantifier) ont été produits par manque de temps pour terminer le questionnaire. Après enseignement, le taux d'absence d'information est quasiment divisé par deux. Il n'y a plus d'élèves qui affirment ne pas comprendre la question. 6% ne donnent pas de réponse (pourcentage donc sensiblement constant qui peut lui aussi s'expliquer largement par le manque de temps) et ils ne sont plus que 5% à affirmer ne pas savoir. Le taux d'absence d'information de 20% avant enseignement doit aussi être interprété en prenant en compte le pourcentage d'élèves cochant une case sans donner le moindre mot d'explication (ce qui est parfois le moyen de considérer qu'on a répondu sans vraiment répondre, pour "se débarrasser" de la question, le cas extrême étant la réponse au hasard). Or ce taux d'absence d'information (concernant la précision demandée) est de 40% des élèves ayant coché une des deux cases avant enseignement (79 sur 198 élèves). Sur ces 79 élèves, 30 affirment même par écrit ne pas savoir ce qui change. Tout se passe comme si ces élèves avaient juste une intuition sur l'endroit où se déroule la modification. On voit donc

que le fait de cocher une case n'implique pas la possibilité de se prononcer davantage. On retiendra globalement la difficulté à répondre plus en détail à cette question avant enseignement. Après enseignement, 49 élèves sur 222 ayant coché une case ne donnent pas d'information (22%). La proportion chute donc de façon importante mais il y a encore plus d'un cinquième des élèves ne pouvant justifier leur choix. Vu le contexte du problème ici posé, nous pouvons difficilement attribuer ceci au caractère évident de la réponse, comme nous l'avons fait pour d'autres questions. Au total, ce sont 52% des élèves qui ne donnent pas d'informations écrites sur cette question (autre que "je ne sais pas", "je ne comprends pas" ou une case cochée), 31% des élèves après enseignement. On observe donc globalement un apport important de l'enseignement sur la capacité à interpréter la situation proposée même si le taux d'élèves ayant du mal à répondre reste important.

Un événement qui a lieu très majoritairement au niveau de la vibration En gardant à l'esprit toutes les précautions liées à ce que nous venons de dire au sujet des choix qui peuvent être fait sans idées très précises (voire au hasard), nous pouvons quand même analyser les réponses au choix multiple. Rappelons que ce choix ne constitue qu'une partie de la réponse demandée en indiquant la localisation de l'événement cause du caractère plus aigu du son. Les résultats sont regroupés dans le diagramme VIII.1-36.

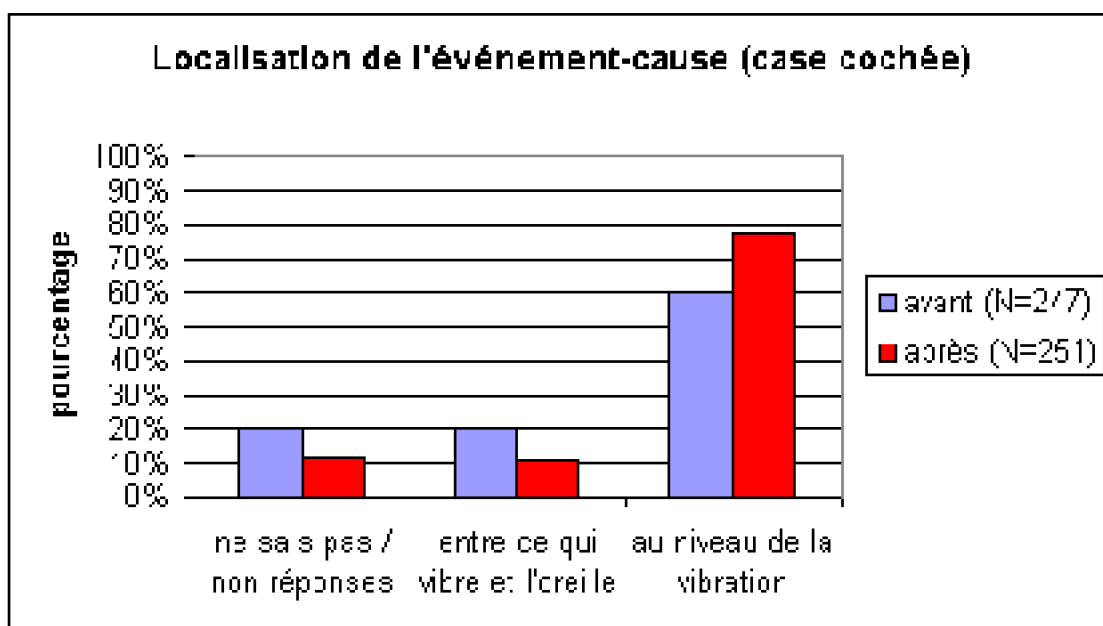


diagramme VIII.1-36 : question S, réponses au choix multiple

La causalité est donc très largement attribuée à la vibration (tout au moins à l'objet qui vibre), ce point de vue tendant à augmenter après enseignement pour représenter plus des trois quarts des réponses. Ce n'est donc pas l'enseignement qui rend ce point de vue dominant. Comme nous pouvions nous y attendre, la cause des changements de sensation perceptive est largement attribuée à l'objet source (transparence du milieu). L'enseignement ne fait que renforcer ce point de vue, ce qui n'a rien d'étonnant comme on l'a déjà vu. Ceci permet également de dire que les réponses se font bien plus dans le

cadre conceptuel 3 que dans le cadre conceptuel 2 "son hors source". Il reste néanmoins un peu plus de 10% d'élèves (28) qui estiment après enseignement que le son plus aigu est lié à quelque chose qui a lieu entre la source et l'oreille. Il reste à savoir si ces 10% produisent cette réponse du fait de l'enseignement reçu. En fait, plus d'un tiers de ces 28 élèves ne donnent pas d'éléments de réponses (9 non réponses et 2 "je ne sais pas") et près d'un cinquième répondent d'un point de vue microscopique probablement importé de l'enseignement (exemple très élaboré de ce type de réponse : *P10206* après "les molécules seront comprimées un plus grand nombre de fois dans un temps donné (fréquence)"). Sur ces 28 élèves, 8 cochaient déjà la même case avant enseignement mais 11 pensaient que la cause se situe au niveau de la vibration. Ces 11 élèves ont donc changé de point de vue et il est raisonnable de penser que ceci est dû à une meilleure connaissance de ce qui se passe dans le milieu. Au sujet de ce qui change dans la situation, avant enseignement, l'essentiel des élèves cochant "entre ce qui vibre et l'oreille" ne donnent pas d'explication (22% d'entre eux, 11 sur 49), un quart ne sait pas dire ce qui change (25%, 12 sur 49), et une près d'un cinquième redécrit l'évolution à l'aide d'un paramètre physique (18%, 9 sur 49). Nous allons essentiellement étudier à partir de maintenant les justifications (précisions) fournies par les élèves pensant que la cause de la variation du son est située au niveau de la vibration. Les justifications les plus fréquentes sont regroupées dans le diagramme VIII.1-37.

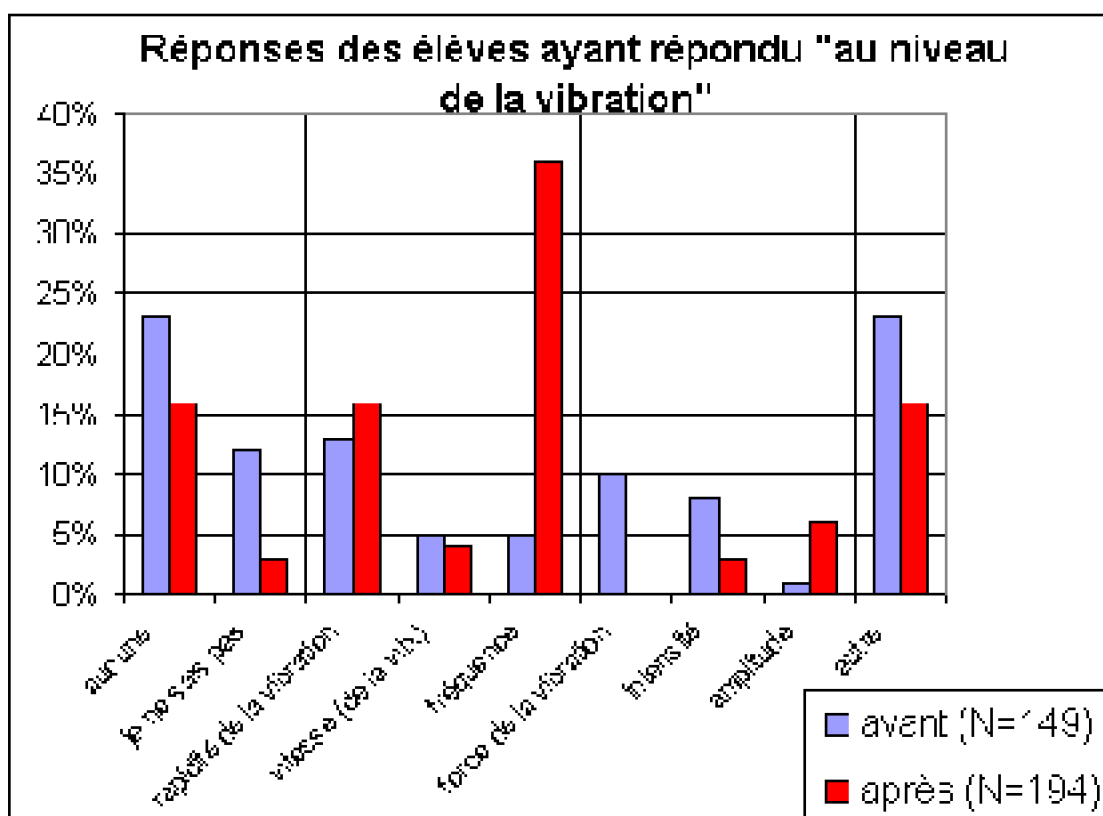


diagramme VIII.1-37 : question S, évolution des justifications les plus fréquentes

En quoi la vibration est-elle modifiée ? Ils sont 149 élèves avant enseignement et 194

après enseignement à penser que l'évolution de la perception est due à quelque chose qui se passe au niveau de la vibration (2^e case). Il y a donc une évolution importante de ce point de vue. Comme nous l'avons déjà dit le nombre d'élèves ne justifiant pas leur choix ou n'étant pas capables de le faire reste important même après enseignement. Les autres réponses peuvent être regroupées selon les catégories suivantes :

—

Les réponses qui invoquent la "rapidité" de la vibration. Nous utilisons volontairement le terme "rapidité" ici dans la mesure où il n'est pas présent dans le savoir à enseigner mais utilisé par les élèves pour dire que la fréquence de vibration augmente. Ce terme est explicitement utilisé par environ 15% des élèves (ayant cochée la 2^e case) aussi bien avant qu'après (avec une légère augmentation). Nous estimons que cette formulation ainsi que celle qui invoque l'augmentation de la vitesse de vibration sont des formulations en langage courant d'une idée qui, en termes plus scientifiques, s'exprimerait sous une forme du type "augmentation de la fréquence". Voici quelques exemples de réponses relevées avant enseignement :

*

L11123 **"elle est devenue plus rapide"** (formulation très souvent utilisée)

*

L13101 **"la vibration est plus rapide"**

*

L13109 **"la vibration a un rythme plus rapide"**

*

L04120 **"l'objet vibre plus ou moins rapidement"**

*

L07101 **"elle est plus rapide et plus tendue"**

*

L07301 **"vibration plus rapide des membranes"**

*

L07111 **"la vibration est plus rapide et moins espacée"**

*

L11109 **"si le son devient plus aigu c'est qu'il y a ralentissement de la vibration"**

*

L11118 **"la vibration est plus accélérée"**

*

L01127 **"elle vibre plus vite"**

Cette idée globale de rapidité, qui apparaît comme la réponse correcte du point de vue du savoir à enseigner (au choix des termes près), est exprimée dans 23% des cas avant enseignement (35 sur 149, dont 13 redoublants!) et le pourcentage double après enseignement (107 sur 194). Il est donc remarquable que la justification d'un son

devenant plus aigu ne soit attribué à l'idée de rapidité de vibration que par 32 élèves sur 211 non redoublants avant enseignement (15%). Ce résultat tend à justifier le choix du groupe SOC quant à l'importance à donner à l'établissement de liens (sans masquer les simplifications dont ils résultent) entre paramètres perceptifs et concepts physiques caractérisant les événements. Outre l'augmentation importante de ces "bonnes" réponses que l'on peut raisonnablement attribuer à l'enseignement suivi, il est remarquable de noter l'évolution des termes et des concepts utilisés pour exprimer cette idée. Si les termes "rapidité" et "vitesse" restent assez utilisés (ce dernier n'étant pas sans risque de confusion avec la "vitesse du son"), le concept de *fréquence*, quasiment pas utilisé avant enseignement prédomine ensuite avec plus de 35% des cas. Il y a donc une évolution forte vers l'utilisation d'un concept de la physique suffisamment efficace pour décrire l'idée à exprimer. Remarquons cependant que l'utilisation du terme *fréquence* ne garantit pas la compréhension de ce qui se passe effectivement mais peut apparaître dans certains cas comme la récitation d'un savoir scolaire appris. Notons aussi que nous n'avons pas distingué ici les réponses qui mentionnent une *augmentation* de la fréquence de celles, beaucoup moins nombreuses, qui mentionnent une *diminution*. Nous pourrions enfin ajouter à ces réponses celles qui évoquent maladroitement, ou moins explicitement, la même idée. Ces réponses sont par exemple :

- P02331 ***"le nombre de vibration est supérieur à celle d'avant"***
- P13103 ***"il y a plus de Hertz"***
- P07112 ***"si le son est plus aigu il y a un plus grand nombre de vibrations"***
- P07124 ***"les vibrations sont plus rapprochées"***
- P07313 ***"elle est plus courte"***
- L10227 ***"elle est plus courte"***
- L07302 ***"les vibrations sont moins espacées"***

Ces réponses sont au nombre de 9 après enseignement et 4 avant, ce qui a pour effet de donner un peu plus d'importance encore à l'idée d'une augmentation de la fréquence de vibration. On peut enfin vérifier qu'il y a bien un phénomène de glissement lexical vers *fréquence*. En effet parmi les 28 élèves parlant de *rapidité*, de *vitesse* ou exprimant la même idée de façon floue, 12 répondent en terme de *fréquence* après enseignement tandis que 8 continuent à utiliser les mêmes termes.

Les réponses qui invoquent un concept que le savoir à enseigner relie au niveau

acoustique.

Nous regroupons dans cette catégorie les réponses affirmant que ce qui est modifié au niveau de la vibration est la *force*, l'*intensité* ou l'*amplitude*. Ces concepts, qu'ils soient quotidiens ou scientifiques sont liés à l'augmentation du niveau acoustique. Les pourcentages globaux sont 19% avant et 12% après. Il y a donc une chute symétrique à l'augmentation des réponses en termes de "rapidité", elle aussi due à l'enseignement. Là encore l'évolution lexicale est importante : les concepts quotidiens de *force* et d'*intensité* tendent à disparaître pour le premier, à s'effacer pour le second, alors que le concept d'*amplitude* émerge. Il y a donc un glissement sémantique important qui peut révéler une évolution de la précision de ce que l'élève veut dire.

Signalons que, parmi les élèves ayant coché la 2^e case "vibration", 12% produisent une réponse erronée produite de la confusion, dans la relation avec le caractère aigu / grave, entre fréquence et amplitude.

Remarque : sur les 24 redoublants ayant coché cette case avant enseignement, 9 citent la rapidité de la vibration, 1 cite la vitesse, 3 la fréquence, 1 la force et 1 l'amplitude. Nous émettons alors l'hypothèse que l'idée qui reste quelques temps après l'enseignement est celle de rapidité (exprimée à l'aide de termes courants). Ceci confirme également que passer le questionnaire juste après enseignement renforce l'utilisation d'un vocabulaire "scientifique".

VIII.1.11.4 Comparaison Soc / non SOC

Nous allons tenter dans cette partie d'évaluer les éventuelles différences significatives entre les deux populations étudiées au sujet des grandes tendances dégagées précédemment.

Il est utile de rappeler à ce stade que cette question est fortement concernée par ce qui peut faire la spécificité du contenu proposé par le groupe SOC. Plus précisément, un point fondamental de ce contenu aide à traiter cette question. En effet, le lien entre la fréquence de vibration et le caractère aigu /grave est présenté par le groupe SOC comme une modélisation fondamentale dans l'enseignement de la physique au sujet du son (avec le lien dialectique amplitude – niveau sonore et sans nier le caractère simplificateur de ces liens). La fréquence est dans ce cadre définie précisément (voir *modèle de la vibration* du groupe SOC). L'effet de ce type de relation modélisante sur l'évolution des réponses à certaines questions (question I et N en particulier) a déjà été souligné ou le sera par la suite (question T et A). Nous pouvons donc nous attendre ici à une évolution plus importante des élèves ayant suivi le contenu SOC vers une causalité attribuée à la vibration, mais surtout vers une invocation plus importante après enseignement de l'augmentation de la fréquence.

Cependant, il ne faut pas oublier que le groupe SOC fait également du modèle microscopique un point fondamental. Ce modèle décrit en particulier le mouvement de vibration des particules comme lié au mouvement vibratoire de l'objet source. Une bonne compréhension et utilisation de ce modèle peut même permettre de conclure à un rapprochement des zones de compressions dans le milieu (ou diminution de la longueur d'onde, concept introduit dans ce modèle). Ainsi, si la prégnance de ce modèle (dans le

cas où il est compris et utilisé) devient trop importante, la réponse peut invoquer une modification du milieu au lieu d'invoquer une modification de la vibration. Ceci suppose cependant une relative maîtrise du fonctionnement du modèle, ce qui, nous l'avons vu par ailleurs, est une difficulté que peu d'élèves surmontent réellement.

Les résultats comparés peuvent quoi qu'il en soit être l'occasion d'estimer l'effet d'un contenu d'enseignement basé sur la modélisation (comme l'est le contenu SOC) sur une question qui invite justement à modéliser.

Commençons par observer les réponses concernant la localisation de la cause de l'évolution sonore (choix multiple). Les résultats sont regroupés dans le diagramme VIII.1-38 ci-dessous.

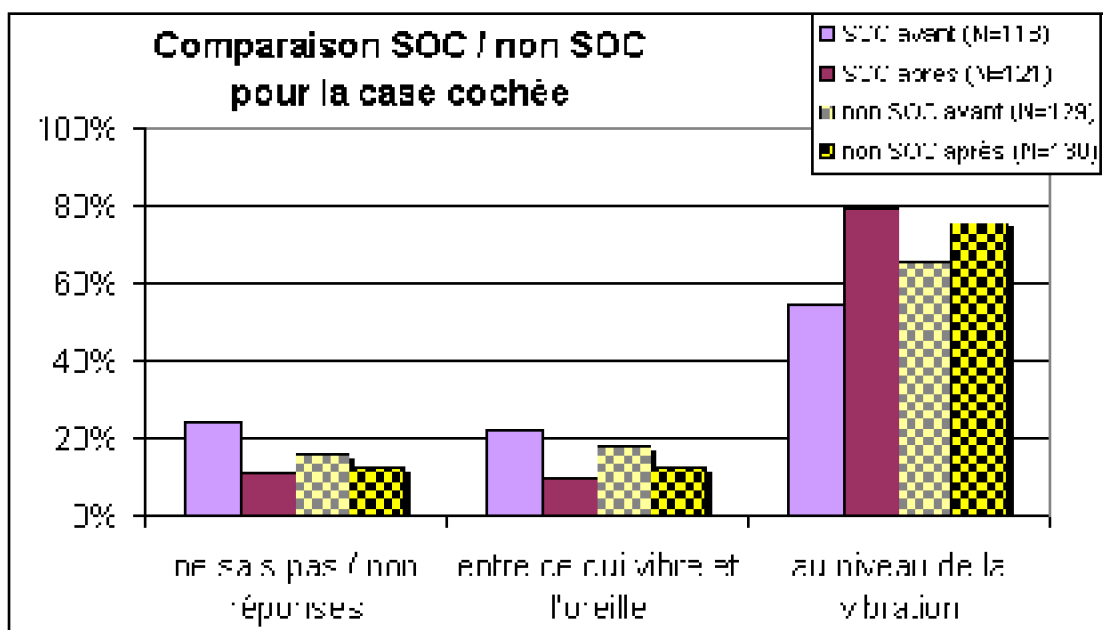


diagramme VIII.1-38 : question S, évolution des réponses au choix multiple selon la population

Nous ne revenons pas sur les proportions relatives des différents choix. Les pourcentages pour "au niveau de la vibration" sont forts avant et après enseignement pour les deux populations et l'augmentation ne peut être alors que limitée (et donc la différence d'augmentation aussi). Nous pouvons néanmoins noter une tendance importante à une augmentation plus forte de ce choix (cause "vibration") pour la population SOC. En effet ce choix augmente de 25% pour la population SOC contre 9% seulement pour l'autre population. Ceci confirme l'utilité (et la capacité à être utilisé) du modèle de la vibration proposé par SOC sur ce type de situation. La cause première est bien attribuée à quelque chose que se passe au niveau de la vibration.

10% des élèves des classes SOC continuent à invoquer une modification dans le milieu, pourcentage qui résulte de façon quelque peu symétrique d'une baisse plus importante que pour les autres élèves.

La diminution des non réponses et des réponses "je ne sais pas" pour la population SOC est également plus importante. Cette tendance demanderait cependant à être

confirmée par des échantillons plus importants.

En fait, pour rendre compte de la différence de capacité à répondre des deux populations, il est préférable de s'intéresser aux taux de non réponses *une fois* une case cochée plutôt qu'aux taux de cases non cochées. Nous avons déjà dit que l'absence de précision de ce qui change, une fois une case cochée, était courante (non réponses ou "je ne sais pas ce qui change"), et qu'elle révélait une difficulté réelle à répondre malgré une intuition sur la localisation de la cause. Nous avons regroupé dans le diagramme VIII.1-39 ces cas pour chaque population, ramenés aux nombres d'élèves ayant coché une des deux cases proposées.

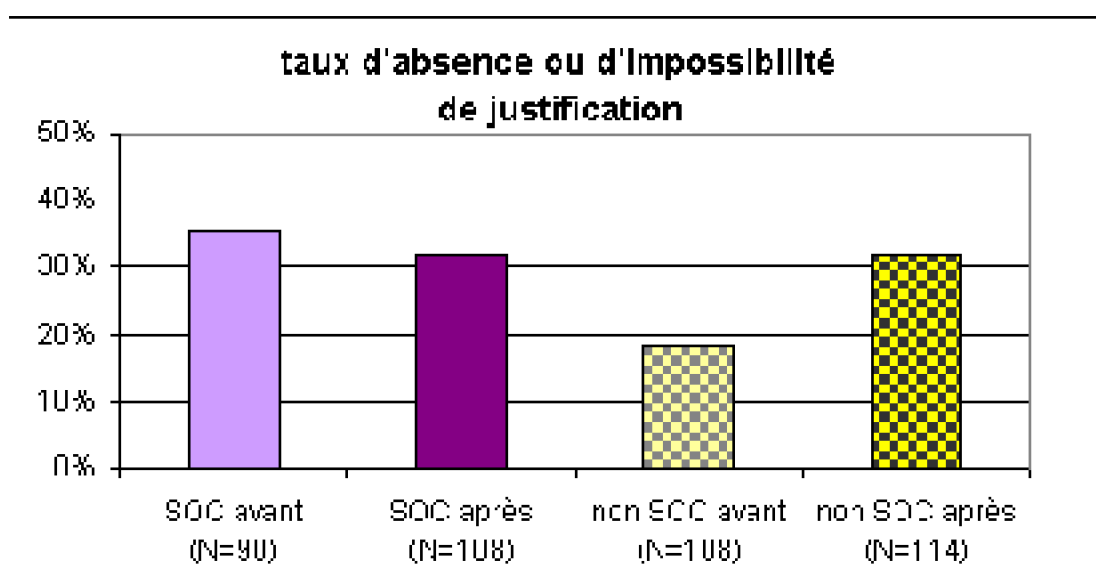


diagramme VIII.1-39 : question S, taux d'absence ou d'impossibilité de justification selon la population

Il est alors tout à fait remarquable de constater que ce taux diminue légèrement pour les élèves ayant suivi le contenu SOC alors qu'il augmente de 13% pour les autres. Si l'on considère que les cas dus à un manque de temps sont en proportion égale dans les deux populations, les élèves n'étant pas dans une classe SOC semblent donc plus démunis après enseignement qu'avant pour répondre de façon précise à la question. C'est essentiellement cette précision demandée qui appelle une modélisation (quel événement ou phénomène dois-je mettre en relation avec le son plus aigu ?). On peut donc conclure que cette activité de modélisation n'est en rien devenue plus facile après enseignement, bien au contraire.

Nous allons maintenant confirmer ceci en analysant les précisions fournies par les élèves selon leur appartenance à l'une ou l'autre des populations.

Élèves répondant "entre ce qui vibre et l'oreille" Les petits nombres d'élèves répondant de la sorte (aussi bien avant qu'après) ainsi que la quantité importante d'absence de précision rend difficile une comparaison significative. On a en effet au maximum 26 élèves d'une population (SOC avant) qui cochent cette case. Si on enlève les élèves qui

ne précisent pas ce qui change on obtient les nombres suivants de réponses :

Tableau VIII.1-8 : question S, faiblesse des nombres d'élèves qui cochent la 1^{ère} case (entre ce qui vibre et l'oreille) et qui donnent une précision sur ce qui change

SOC avant	SOC après	Non SOC avant	Non SOC après
14	9	12	8

Il serait donc illusoire de dégager des différences de comportements sur des échantillons aussi petits.

Élèves répondant "au niveau de la vibration" Le nombre d'élèves concernés par cette réponse est beaucoup plus important. La première chose à laquelle nous pouvons nous intéresser a déjà été en partie discutée puisqu'elle concerne le taux d'absence de précision. Sur ce point, la différence entre les deux populations est ici remarquable (de 20% à 6% pour les élèves SOC alors qu'elle augmente de 1% pour les "non SOC"). On peut donc affirmer qu'il y a un effet de l'appartenance à tel ou tel groupe. La population SOC a beaucoup moins de mal à exprimer ce en quoi la vibration est modifiée (9% après enseignement contre 29% pour la population non SOC). Malgré un taux important d'absence de précision, les échantillons d'élèves précisant leur réponse sur ce qui se passe au niveau de la vibration sont bien plus grands que dans le cas de la réponse "entre ce qui vibre et l'oreille" (tableau ci-dessous).

Tableau VIII.1-9 : question S, nombres d'élèves qui cochent la 2^e case (au niveau de la vibration) et qui donnent une précision sur ce qui change

SOC avant	SOC après	Non SOC avant	Non SOC après
44	87	53	70

Le diagramme VIII.1-40 fournit la répartition des réponses des élèves ayant coché la 2^e case (au niveau de la vibration).

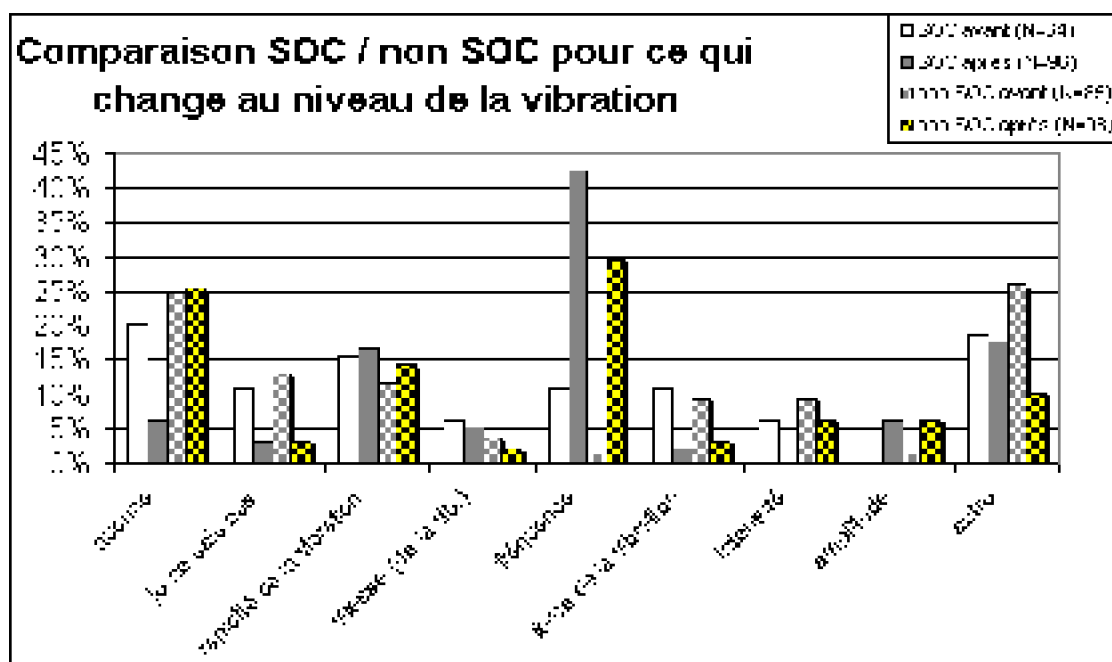


diagramme VIII.1-40 : question S, précision de ce qui change (au niveau de la vibration) selon la population

Il est remarquable de constater une évolution plus importante du recours au concept de fréquence pour la population SOC (de 7 à 41 réponses contre 1 à 29 pour la population non SOC). La différence entre les deux populations à ce sujet est peut-être moins importante que ce à quoi nous pouvions nous attendre, en tous les cas moins importante que les différences constatées sur d'autres questions au sujet de l'utilisation de ce concept. Ceci semble indiquer que le concept est bien présenté par les contenus autre que SOC mais que les élèves **y recourent moins largement, c'est-à-dire pour des situations moins diverses**. Il faut que le contexte soit très proche du contexte qui a été lié à *fréquence* en classe (comme c'est la cas ici) pour que les élèves "activent" ce concept.

Notons que le pourcentage d'élèves mentionnant une idée voisine de la "rapidité" de la vibration (vitesse, fréquence...) passe de 33% à 65% pour la population SOC, et de 17% à 46% pour l'autre population. Cette idée dépasse donc largement la moitié des réponses après enseignement pour la population SOC.

Par contre, ni le contenu proposé par la groupe SOC ni un autre n'induit une diminution de l'usage des termes courants "rapidité" et "vitesse" (de la vibration). Il serait intéressant de savoir si ceci est dû à l'utilisation de "rapidité de la vibration" comme un moyen d'explicitier le phénomène. Avoir recours à une telle expression peut être le signe, pour certains élèves, d'une compréhension de ce qui se passe, alors que l'invocation d'une augmentation de la fréquence, savoir qu'ils jugent plus scolaire, ferait plus difficilement sens pour eux. Nous percevons là la **difficulté des élèves à utiliser des concepts de la physique** lorsqu'ils disposent de termes du langage courant pour décrire les phénomènes en jeu.

Les nombres d'élèves produisant des réponses mentionnant quelque chose liée à

l'amplitude de la vibration sont assez petits. Il n'y pas de différence significative entre les deux populations à ce sujet. Enfin, l'étude lexicale dont nous allons parler juste après nous indique qu'*intensité* n'est plus cité que par des élèves non SOC après enseignement.

VIII.1.11.5 Évolution lexicale

L'étude de l'emploi des termes étudiés n'apporte pas vraiment plus d'informations que ce que nous venons déjà de dire.

79 élèves citent au moins un mot de la liste étudiée avant enseignement, 131 élèves après. En fait parmi toutes les citations, les termes *vibrer* et *vibration*, repris de l'énoncé, prédominent, ce qui tend à faire perdre tout intérêt à ces nombres. L'un ou l'autre de ces deux termes est cité par 13% des élèves avant enseignement et par 48% des élèves après enseignement. La progression est légèrement plus importante pour les élèves des classes SOC.

Par rapport aux élèves qui rédigent quelque chose pour préciser ce qui change, ceux qui utilisent *vibrer* ou *vibration* représentent 55% avant (68 sur 123) et 49% après (85 sur 174), ce qui prouve que ramené aux réponses effectives, l'utilisation de *vibrer* et *vibration* ne progresse pas.

Intéressons-nous maintenant aux autres termes. En ne décomptant ni *vibrer*, ni *vibration*, ni *aigu*, présent dans l'énoncé, nous ne trouvons plus que 19 élèves avant et 83 après. Hors les mots de l'énoncé, il y a donc une nette progression de l'utilisation des mots étudiés.

Sur les 20 mots cités avant enseignement (autres que *vibrer*, *vibration* et *aigu*), *intensité* est cité 14 fois et *fréquence* 8 fois (dont 3 fois par des redoublants). Sur les 85 mots cités après enseignement, *fréquence* est cité 74 fois, *intensité* 6 fois, *propagation* 3 fois et *émetteur* 2 fois.

Ces résultats indiquent d'une part que le concept de *fréquence* est quasiment absent avant enseignement au sujet d'une situation pour laquelle la physique le fait inévitablement intervenir, d'autre part que ce concept émerge fortement après enseignement.

Remarquons qu'après enseignement, 36% des élèves SOC mentionnent la fréquence contre 23% seulement pour les autres élèves (respectivement 6% et 1% avant). Il y a donc une tendance à l'utilisation plus forte pour la population SOC.

VIII.1.12 Question T

VIII.1.12.1 Énoncé

On dit souvent qu'un son a trois caractéristiques : le niveau acoustique (fort/faible), la hauteur (aigu/grave) et le timbre (plus ou moins riche). Donnez un concept physique (ou un paramètre physique), concernant la vibration sonore, qui correspond à chacune de ces trois propriétés.

caractéristique du son:	niveau acoustique	hauteur	timbre
paramètre physique:	de la vibration	de la vibration	de la vibration
Dites ensuite, en complétant chaque phrase, comment ce paramètre doit évoluer (augmenter ou diminuer par exemple) pour obtenir le résultat indiqué :			
	doit pour que le son soit plus fort	doit pour que le son soit plus aigu	doit pour que le son soit plus riche

VIII.1.12.2 Présentation

Cette question est la seule du questionnaire formulée dans les termes de la physique. Elle n'est en conséquence présente qu'après enseignement (pour assurer une compréhension minimale).

C'est la modélisation des paramètres perceptifs par les grandeurs physiques de la vibration correspondante qui est en jeu ici. La formulation même présuppose des connaissances importantes : nécessité de quelque chose en *vibration* pour avoir un son, utilisation de *paramètres physiques* pour *caractériser* toute vibration, concepts de *niveau acoustique*, *hauteur* et *timbre*.

Le contexte est donc clairement celui de la physique et en particulier celui du savoir à enseigner. Les concepts qui, du point de vue du savoir à enseigner, permettent de caractériser les sensations perceptives (niveau acoustique, hauteur, timbre) sont réintroduits, puis il est demandé de désigner les concepts de la physique, paramètres de la vibration, à mettre en correspondance. Cette question met donc en jeu d'une part un vocabulaire complexe, d'autre part une activité délicate visant à faire fonctionner le modèle (explicité comme tel ou non en classe) de la vibration sonore en relation avec les sons perçus. En particulier, les termes "paramètres" et "concepts physiques" ne sont pas forcément bien compris et l'objet de la question peut ne pas être saisi.

Jusque dans sa présentation, la question peut apparaître complexe puisque le deuxième tableau se réfère au premier en évoquant l'évolution dynamique respective des paramètres pour créer l'effet perceptif décrit.

Finalement, cette question peut facilement être reconnue par l'élève comme une "question de physique" que son enseignant aurait pu lui poser en séance d'évaluation.

Remarque : nous n'avons volontairement pas souhaité demander le paramètre physique qui *gouverne* ou *détermine* la propriété (nous avons préféré le verbe *correspondre*), dans la mesure où le lien n'est pas strict mais résulte d'une simplification qui constitue une bonne approximation. La correspondance est bien *fixée par la physique*, dans un processus de modélisation. Pour une critique plus approfondie de l'importance de ces liens dans l'enseignement, nous renvoyons aux chapitres I et II.

Le groupe SOC insiste beaucoup sur les deux premiers liens évoqués ici (formulés en ces termes). Le contenu qu'il propose s'attache à expliciter la différence entre ce qui relève de la perception et ce qui relève du modèle.

Le savoir à enseigner, tel que présenté dans le programme de seconde de lie pas explicitement niveau sonore et amplitude de vibration. Ce sont davantage les concepts d'intensité et de puissance sonore qui sont étudiés. Par contre "Associer la notion de hauteur d'un son à la fréquence de celui-ci" fait partie des *compétences exigibles ou en cours d'apprentissage*. On remarquera qu'il n'est jamais explicitement fait de liens dans le programme entre fréquence du son et fréquence de la vibration source (le lien, implicite, est assuré par la fréquence de la tension correspondante visualisée à l'oscilloscope).

Le timbre est aussi une notion au programme.

Malgré toutes ces précisions, il est logique de penser que le contenu d'enseignement peut permettre de donner la réponse suivante, "juste" du point de vue du savoir à enseigner :

Tableau VIII.1-10 : question T, réponses "juste" du point de vue du savoir à enseigner

caractéristique du son:	niveau acoustique	Hauteur	timbre
paramètre physique:	AMPLITUDE de la vibration	FREQUENCE de la vibration	FORME (ou SPECTRE) de la vibration
	Doit AUGMENTER pour que le son soit plus fort	doit AUGMENTER pour que le son soit plus aigu	Doit SE COMPLEXIFIER pour que le son soit plus riche

La dernière colonne est évidemment la plus difficile à formuler puisqu'il faut fournir un paramètre de la vibration déterminant le timbre. L'objectif n'était pas ici de contrôler cette connaissance mais davantage de "compléter" le problème en référence à la façon dont le savoir à enseigner caractérise le son (caractérisé par 3 propriétés).

Les objectifs plus généraux de cette question étaient les suivants :

- déterminer la capacité à comprendre une question impliquant une modélisation forte ;
- observer les termes avancés pour désigner les concepts ou paramètres physique liés à la hauteur et au niveau acoustique ;
- observer les éventuelles différences entre les deux populations étudiées ; en particulier le modèle proposé par le groupe SOC apporte-t-il vraiment quelque chose pour la description de ce type de phénomènes ?

VIII.1.12.3 Résultats essentiels

Un taux d'absence d'information relativement faible La compréhension ne paraît pas si difficile que prévue puisque seuls 5% des élèves affirment ne pas comprendre ce qu'on leur demande. Si on ajoute les 13,5% qui ne donnent aucune réponse (pour aucun des trois paramètres) on obtient moins d'un cinquième d'absence totale de réponses. De plus, un bon nombre de ces absences sont dues à la position finale de la question et au manque de temps pour y répondre (dans certains cas la question n'a même pas pu être lue). Il faut également considérer les absences de réponses sur l'un des paramètres (mais pas sur tous ce qui indique que la question a été lue) : 9% pour niveau acoustique, 7% pour hauteur et 42% pour timbre). Mentionnons enfin les quelques réponses "je ne sais pas" (2% pour niveau acoustique et hauteur, 7% pour le timbre) pour compléter l'analyse des réponses ne donnant pas d'informations. Au total l'absence d'information représente donc environ 30% (5%+13,5%+9%+2%) pour "niveau acoustique", 28% pour "hauteur" et 68% pour le "timbre" ! N'oublions pas qu'une partie non négligeable des élèves entrant dans cette catégorie n'a pas eu le temps de traiter la question. Cependant ces pourcentages sont suffisamment importants pour montrer une difficulté à fournir des paramètres physiques comme outils interprétatifs de caractéristiques perceptives après un enseignement dont c'est pourtant en partie l'objectif. C'est évidemment le timbre qui est le moins traité. Il faut signaler à ce stade que certains enseignants n'ont pas évoqué le mot, certains n'ayant pas traité du tout d'acoustique musicale (partie dans laquelle sont normalement évoqués timbre, façon dont ça vibre, forme du signal ou spectre). Nous savons juste qu'au moins 5 classes sur 8 ont traité cette partie. Nous n'accorderons donc pas de signification importante aux résultats concernant le timbre.

Paramètre physique correspondant au niveau acoustique Le diagramme VIII.1-40-2 donne un aperçu rapide des paramètres cités pour le niveau acoustique :

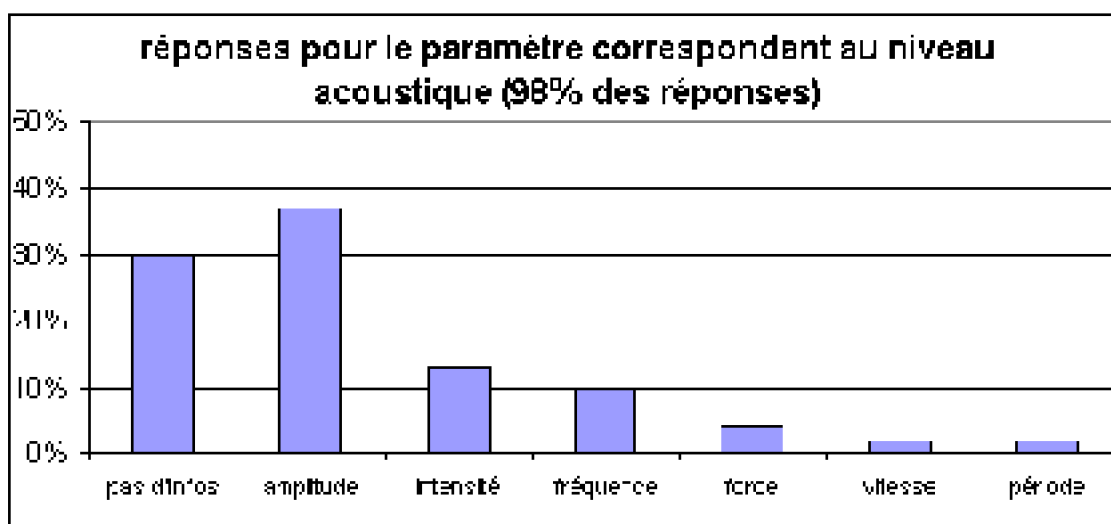


diagramme VIII.1-40-2 : question T, paramètres physiques cités pour la correspondance avec le niveau acoustique

Le concept d'amplitude est le plus cité (94 élèves) mais on rencontre également *intensité* (32) et *fréquence* (26). Il est intéressant de constater que le concept

d'intensité peut être attribué à la vibration, par un processus qui laisse penser qu'il y a imbrication entre amplitude, intensité, niveau acoustique, fort/faible dans les paramètres utiles pour décrire la sensation plus ou moins forte du son. Cette imbrication peut ensuite être utilisée pour décrire ce qui est perçu ou ce qui relève des événements causes. Le lien erroné fréquence – niveau acoustique est fait par 10% des élèves. Le concept quotidien de *force* (présent dans "un son fort") continue à être présent comme caractéristique de la situation, en particulier par proximité lexicale. Le reste des citations est plus rare (on trouve, cité 3 fois au maximum, *vitesse*, *période*, *volume*, *puissance*, *niveau acoustique*, U_m (symbole de l'amplitude souvent utilisé en cours), *rapidité*...). Finalement **moins de 40% des élèves sont capables de relier après enseignement l'amplitude la vibration et le caractère plus ou moins fort du son**. Notons que 95% des élèves citant l'amplitude précisent qu'elle doit diminuer pour que le son soit moins fort. Ce fort pourcentage contribue à indiquer que la question est effectivement comprise et/ou que ces élèves sont capables de faire fonctionner les liens appris, mais il peut également résulter de l'association intuitive classique du type "plus fort donc ça augmente" ou qui relie plus généralement "plus" avec "augmente".

Paramètre physique correspondant à la hauteur Le diagramme VIII.1-41 donne un aperçu des paramètres cités pour la hauteur :

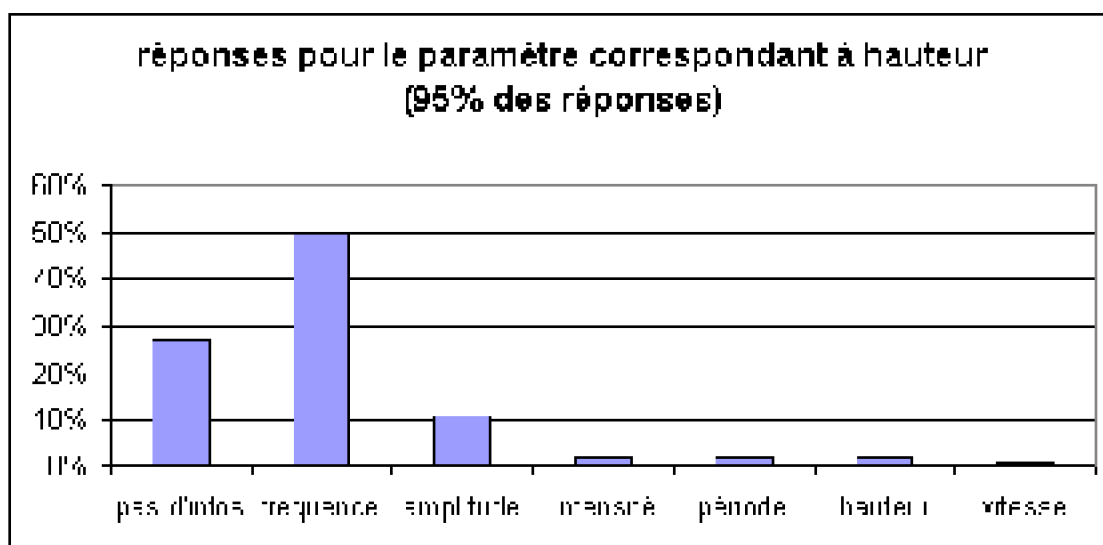


diagramme VIII.1-41 : question T, paramètres physiques cités pour la correspondance avec la hauteur

La moitié des élèves indiquent avec raison que c'est la fréquence de la vibration qui correspond à la hauteur du son. Le résultat est donc meilleur que pour le niveau acoustique. Nous retrouvons la même proportion d'élèves confondant amplitude et fréquence puisque ce sont quasiment les mêmes élèves qui relient niveau acoustique et fréquence, et hauteur et amplitude (sur les 26 élèves citant fréquence pour le niveau, 18 citent amplitude pour la hauteur, 5 citent l'intensité). Les mots très peu cités sont à peu près les mêmes que dans le cas précédent. 79% des élèves ayant cité la fréquence la font varier dans le bon sens pour que le son soit plus aigu. On voit donc que cette évolution est plus difficile à déterminer que dans le cas de l'amplitude pour lequel

l'association intuitive "plus fort - plus grand" joue dans le bon sens.

Paramètre physique correspondant au timbre Nous avons déjà dit pourquoi il n'était pas très significatif de parler de ces réponses. Notons juste dire que la diversité des mots cités est ici très grande. *Forme* est cité par 4% des élèves, tout comme intensité. On trouve aussi (moins de 6 occurrences) *période*, *spectre*, *fréquence*, *instrument* (ou *source*), *richesse*, *hauteur*, *tonalité*...

VIII.1.12.4 Comparaison Soc / non SOC

Nous avons déjà mentionné le fait que le modèle vibratoire proposé par le groupe SOC insiste sur les deux premiers liens demandés ici. Les résultats des comparaisons entre les deux populations, regroupés dans les diagrammes VIII.1-42 et VIII.1-43, permettent de tirer les conclusions remarquables suivantes :

le taux d'absence d'information est deux fois moins élevé pour la population SOC. Ceci peut s'expliquer en partie par le vocabulaire utilisé dans la question, qui reprend celui utilisé par le groupe SOC (mais qui n'est que celui du savoir à enseigner). Nous pensons que cette interprétation ne suffit pas à expliquer une telle différence. **La capacité à modéliser et à faire le lien entre paramètres perceptifs et paramètres de la vibration est effectivement accrue par les activités proposées par le groupe SOC.** Ceci justifie l'utilisation en particulier des modèles proposés.

l'amplitude est quasiment le seul concept cité par les élèves des classes SOC en relation avec le niveau acoustique. Ces élèves constituent l'essentiel (80%) de ceux qui mentionnent l'amplitude. Il est remarquable de noter que pour les élèves n'ayant pas suivi la progression SOC, l'intensité est davantage citée que l'amplitude et la fréquence quasiment autant. La diversité des termes utilisés par la population non-SOC est révélatrice d'une confusion importante entre ce qui relève du modèle et ce qui relève de la perception.

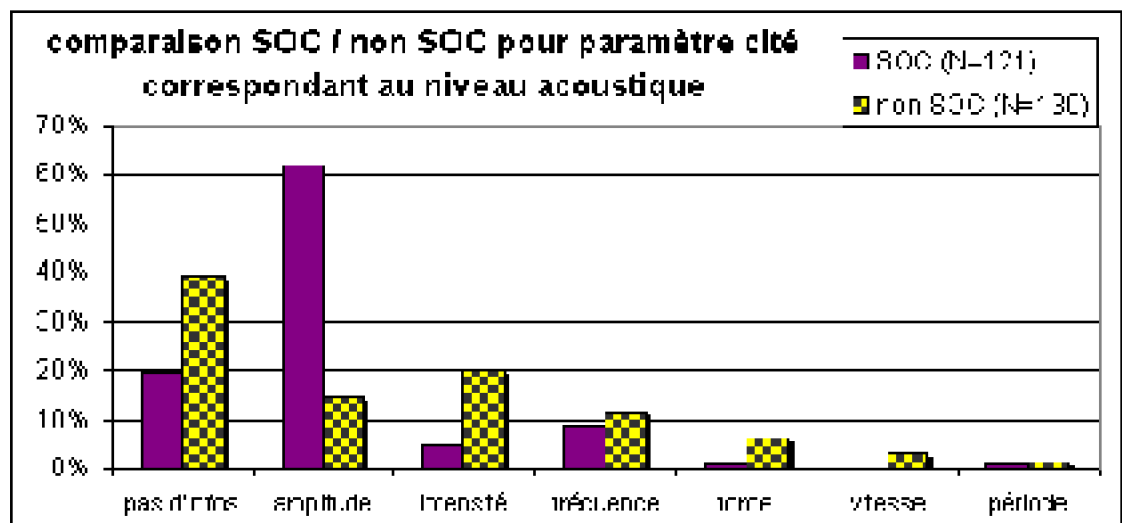


diagramme VIII.1-42 : question T, paramètres physiques cités pour "niveau acoustique", selon la population

Même si elle est moins nette, la différence concernant le terme *fréquence* est également frappante. **La proportion des élèves citant fréquence est deux fois plus importante pour la population SOC.** Quasiment aucun autre terme n'est cité par ces élèves (à part *amplitude*, toujours par confusion).

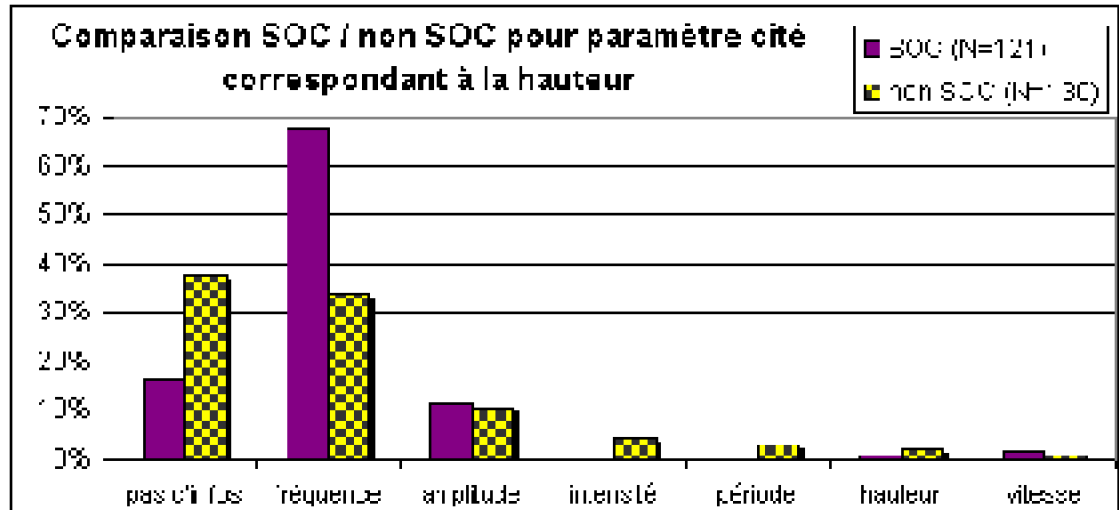


diagramme VIII.1-43 : question T, paramètres physiques cités pour "hauteur", selon la population

Les 75 élèves ayant suivi le contenu SOC et ayant indiqué l'amplitude comme correspondant du niveau acoustique indiquent à 99% que l'amplitude doit augmenter pour avoir un son plus fort (contre 79% pour l'autre population composé ici de 19 élèves). De même, les élèves "SOC" ayant mentionné la fréquence pour la hauteur

indiquent la bonne évolution dans 82% des cas contre 75% pour les autres élèves.

VIII.2 Résultats globaux et conséquences pour l'enseignement

Nous avons à notre disposition des résultats précis, dont la diversité est révélatrice de la variété des questions et des nombreuses idées que les élèves peuvent avoir au sujet du son. Il convient maintenant d'extraire de ces résultats les grandes lignes qui s'en dégagent en réponse aux questions générales que nous avons exposées dans le chapitre précédent (§ VII.2) pour le présent questionnaire, et plus généralement dans le chapitre IV.

Il n'y a bien évidemment rien d'étonnant à retrouver dans les grandes tendances des regroupements de questions et des proximités qui avaient été mis en évidence dans l'analyse *a priori* (voir en particulier le tableau VII.4-2). Ceci apparaît plutôt comme une validation *a posteriori* de cette analyse.

Nous reprenons l'un après l'autre les points développés dans la problématique du chapitre précédent (§ VII.2). Nous ajoutons cependant deux points qui nous paraissent riches d'enseignement et qui émergent de ces résultats :

- d'une part une analyse des taux de réponses, par laquelle nous commençons (§ VIII.2.1) ;

- d'autre part une analyse des écarts entre la vision du son par le savoir à enseigner et celle que les élèves peuvent avoir avant enseignement ; nous traiterons de ce point à la fin de ce chapitre (§ VIII.2.7).

VIII.2.1 Analyse des taux de réponse

Dans cette analyse nous considérons les taux d'absence d'information dans lesquels nous regroupons, rappelons-le, les non-réponses, les réponses "je ne sais pas" et les strictes paraphrases. Les résultats montrent que ces taux sont très variables. Nous nous interrogeons ici sur d'éventuels critères qui auraient une incidence sur ces taux. Les raisons que nous pouvons inférer pour l'absence d'information sont variables : incompréhension d'un élément de la question ou de ce qui est demandé, incapacité à répondre, refus de répondre, voire manque de temps. Nous n'avons pas l'intention ici d'analyser en détail ces différentes différences. Cependant une analyse plus fine semble indiquer que l'incapacité à répondre est la cause principale, qu'elle se manifeste explicitement ("je ne sais pas") ou non (pas de réponse). Le tableau VIII.2-1 récapitule ces taux (en %) pour les différentes questions :

Tableau VIII.2-1 : taux (en %) d'absence d'information

Question	Avant	Après	Contexte matériel
B	2	2	Oui
C	20		
D	13	11	Oui
E		Choix multiple : 13 Justification : 11	
F	Choix multiple : 4 Justification : 5		Oui
G	21	10	En partie
I	De 20 à 40	De 15 à 30	Oui
L	36	38	Oui
N	22	6	
Q	36	10	
S	52	31	
T		Environ 30	

Ainsi, ce tableau montre que, avant enseignement, les situations proposant un contexte matériel correspondent globalement aux plus faibles taux d'absence d'information. Les questions I et L font quelque peu exception mais de façon compréhensible. En effet les situations des cailloux et de la brosse (question I) apparaissent comme des faits bruts pour lesquels il est difficile de formuler une explication. Le taux d'absence d'information pour la situation de l'ambulance (question L) confirme notre hypothèse qu'elle n'est pas reconnue comme familière et qu'elle est extrêmement difficile à interpréter, même à l'aide du savoir à enseigner.

Il semble donc bien que les questions qui recueillent le plus de réponses soient celles qui mettent en scène des objets concrets et des événements si possible familiers. A l'inverse, les questions proposant des situations générales, sans contexte, laissent les élèves bien plus démunis avant enseignement, même si les phénomènes évoqués sont connus. Vu le fort taux initial, les baisses les plus importantes du taux d'absence d'information après enseignement sont observées pour ces questions.

VIII.2.2 Types d'explications : explication contingente ou mécanismes explicatifs larges ?

Pour qu'elle soit contingente à la situation proposée, une explication doit être spécifique aux objets du monde que la situation met en scène. Il convient donc d'abord, pour distinguer des tendances au sujet du degré de généralité des systèmes explicatifs utilisés, de séparer les questions qui ont effectivement un contexte matériel des autres (voir par exemple le tableau VIII.2-1 précédent).

Commençons par ces questions "contextualisées". Les questions I (existence d'un son pour diverses situations) et L (ambulance) donnent lieu à des explications extrêmement contextuelles. Ceci est flagrant pour la question I puisque, au sein d'une même question les explications données pour l'existence du son sont très rarement communes aux quatre situations et peuvent même varier considérablement d'une

situation à l'autre. Parmi ces quatre situations, certaines (essentiellement celle de la guitare et, dans une moindre mesure, celle du violon) favorisent d'ailleurs des explications d'ordre plus conceptuel et plus général, moins liées aux actions ou événements propres à la situation. **Il semble en ce sens que les situations pour lesquelles il est possible d'observer visuellement quelque chose (ou de sentir par le toucher) favorisent cette tendance à la généralisation.**

La question D donnent lieu à des interprétations relativement abstraites et de portée assez générale dans environ la moitié des cas (essentiellement en vertu d'une association entre la distance ou le chemin à parcourir et la perception plus faible du son, ou, pour les idées les plus globalisantes, en vertu de l'amortissement ou du rayonnement du son). La question B (téléphone) demandait d'abord une description puis une justification de la différence des deux sons perçus (dans la plupart des cas les sons sont jugés différents). Décrire cette différence pouvait donc suffire mais dans les cas d'essai d'explication, c'est également le schème "plus loin donc moins fort" qui est utilisé.

La question F (influence d'un mur sur le son) semble elle assez favorable à l'utilisation fréquente d'explications plus élaborées. Nous voyons deux raisons à cela :

• **la présence d'un objet matériel entre émetteur et récepteur oblige** à se placer d'une part dans le cadre conceptuel 2 (son comme entité en déplacement, hors source) et à **proposer des comportements généraux pour le son** ;

• **la représentation schématique peut favoriser la conceptualisation et l'objectivation du son** comme entité subissant des événements et interagissant avec l'environnement spatial : les rebonds contre le mur, les contournement, etc. sont peut-être plus facilement imaginables.

Parmi les autres questions (sans contexte matériel), certaines demandaient explicitement un exemple concret, d'autres semblent favoriser le recours à des situations concrètes non demandées *a priori* (par exemple la question G sur le lieu d'existence du son), d'autres encore favorisent l'utilisation après enseignement de mécanismes explicatifs directement issus du savoir scolaire (questions N, Q, S et T). Il est ici plus difficile d'affirmer que les explications fournies sont contingentes à des situations matérielles qui n'existent pas pour ces questions. Cependant, le recours assez fréquent à des situations réelles pour répondre à ces questions est un indice supplémentaire de la "contingence" des réponses avant enseignement.

Finalement, si nous considérons l'ensemble des questions, **les explications des élèves sont très adaptatives et il est très difficile de dégager des systèmes explicatifs globaux avant enseignement**, si ce n'est que le son, dans son acception quotidienne, est d'abord ce qu'on entend. Cette diversité des explications possibles n'est pas forcément une difficulté pour l'enseignement. Même si elle doit être prise en compte, les processus d'enseignement peuvent s'appuyer de façon profitable sur cette diversité d'idées.

Après enseignement, le recours au milieu de propagation et au concept de

vibration tendent à devenir pertinents, du point de vue des élèves, pour un plus grand nombre de situations.

VIII.2.3 Écarts par rapport aux cadres conceptuels

A part une importance inattendue (par rapport aux cadres conceptuels induits *a priori*) de la facette perceptive du son (CC1), nous avons constaté relativement peu d'écart, avant enseignement, par rapport aux cadres conceptuels induits.

Cette **importance donnée à l'aspect perceptif du son** est en particulier appréciable dans les résultats de la question G (lieu du son) : avant enseignement, un son n'existe que dans l'oreille pour environ un tiers des élèves. Cette prégnance de la perception est également apparue dans les réponses à la question D (concert) et à la question C, qui s'intéresse pourtant au déplacement du son. Nous voyons là la tâche qui attend l'enseignement de la physique pour faire coexister ce point de vue de départ avec d'autres points de vue qui se concrétiseront dans les facettes "physiques" du son.

Après enseignement, les changements de cadre conceptuel sur une question donnée sont assez peu fréquents à une exception près, sur laquelle nous reviendrons d'ailleurs plus tard : **l'importance donnée au milieu de propagation comme support du son** dans des situations où le cadre conceptuel n°2 n'était *a priori* pas attendu (et peu présent avant enseignement) ; c'est le cas de la question G (lieu du son), de la question I et de la question N (condition obligatoire). Il est indéniable que ce résultat est la trace chez les élèves de l'importance du milieu de propagation pour le savoir à enseigner. Ceci est d'autant plus marquant qu'avant enseignement les élèves négligeaient quasi complètement le milieu de propagation pour ces questions.

Ce cadre conceptuel n°2 est cependant utilisé avant enseignement également. Certaines situations invitent en effet à considérer et/ou décrire le déplacement du son. Nous retrouvons alors certaines l'expression de certaines idées cohérentes avec des attributs matériels et substantiels qu'auraient le son et qui ont été mis en évidence par d'autres études (cf. chapitre III) : c'est le cas dans les réponses à la question F (le mur), ou même à la question I puisqu'il est assez souvent mentionné, dans le cas de la guitare, que le son fait résonner ou vibrer la caisse de résonance. Nous ne disons pas ici que cette substantialité est forcément mise en évidence par les réponses à ces questions. Nous remarquons cependant que certains attributs attribués au son par les élèves sont cohérents avec cette vision des choses, cette cohérence pouvant d'ailleurs n'avoir qu'une origine lexicale ou métaphorique : le mur est un obstacle, le son rebondit, le son fait bouger, le son traverse, le son est ralenti...

Le fait que le son soit créé par un objet ou par une action donnée ne semble pas poser de problèmes à ce niveau, y compris avant enseignement. Les élèves semblent tout à fait accepter qu'une fois créé, le son se déplace hors des objets qui lui ont donné naissance (nous voulons pour preuve les résultats à la question E en particulier).

Enfin, il est intéressant de constater que, avant enseignement, le milieu (et le son dans le milieu) n'est considéré que lorsque les autres éléments de la situation ne sont pas jugés pertinents ou adéquats pour expliquer la situation ou les modifications décrites. C'est exactement le critère qui est donné par Casati et Dokic (1994) pour que le milieu

cesse d'être transparent (cf. chapitre I) : c'est le cas par exemple de la situation de la question F (mur qui doit forcément être pris en compte) ou des situations où la variation de perception a une cause forcément spatiale (question B et D). Par contre, dans des situations où le choix est laissé (milieu ou objet-événement cause) pour interpréter des variations perceptives, le milieu est délaissé : c'est ce que montrent les réponses avant enseignement à la question S, puisque le milieu est invoqué par seulement 20% des élèves pour interpréter le caractère plus aigu du son.

VIII.2.4 Niveau de savoir adopté et passages d'un niveau à un autre

En écho à la problématique dégagée au paragraphe VII.2.3, nous tentons ici de dégager des tendances générales du point de vue des niveaux de savoirs utilisés par les élèves, *avant enseignement*.

Avant enseignement, nous pouvons dire de façon générale que les questions qui mettent en scène un contexte matériel et/ou une situation quotidienne sont assez peu propices à l'utilisation de concepts scientifiques ou abstraits. La description des actions, des événements, des perceptions auditives prédomine largement dans les réponses des élèves. C'est le cas pour les questions B, D et F où la description des sons (même lorsqu'elle n'est pas demandée) occupe une place très importante. Pour ces trois questions, **la description des sons perçus se fait bien davantage par des descripteurs perceptifs que par l'usage de propriétés du son** (cf. § VII.2.3). Cette tendance est également observable *via* le niveau de langage utilisé : par exemple, avant enseignement (mais c'est aussi le cas après), les réponses à la question S, pour décrire une augmentation de la fréquence de la vibration, utilisent quasi-exclusivement les termes *rapidité* et *vitesse*. Notons que ce n'est pas parce qu'une situation semble favoriser (par rapport aux autres) l'usage de mécanismes explicatifs relativement généraux (question F en particulier) que le niveau de savoir utilisé est plus "conceptuel" : les explications se font là aussi essentiellement en termes quotidiens.

Le recours aux objets et événements est également constaté pour les questions I et N concernant les conditions de présence d'un son. Nous avons vu à quel point, dans la question I, les explications restent contextualisées à la situation. Ceci peut s'expliquer par le fait que ce sont effectivement des situations concrètes qui sont proposées, le coût cognitif pour expliquer l'existence d'un son est alors probablement moins important lorsqu'on extrait un élément qui semble pertinent dans la situation. Par contre ceci est plus surprenant pour la question N qui était formulée en termes généraux, sans aucun contexte précis. Pourtant, pour cette question aussi nous obtenons, avant enseignement, énormément de conditions actanciennes (taper, faire un choc) ou matérielles (avoir deux objets ou un émetteur particulier). Nous avons vu également que la proposition d'un exemple pour illustrer que le son se propage (question E) ne pose pas de problème. **Il semble ainsi relativement facile pour les élèves de passer d'un problème très général à une situation particulière choisie dans le monde des objets et des événements alors que la démarche inverse semble beaucoup plus difficile : les situations quotidiennes et matérielles ne semblent pas propices à l'utilisation spontanée de concepts scientifiques, ou tout au moins généralisant.**

Nous allons voir que ce point connaît des modifications importantes au cours de l'enseignement.

VIII.2.5 Les effets majeurs de l'enseignement

Nous rappelons ici que les effets de l'enseignement ne peuvent être observés qu'à partir des réponses aux 9 questions (parmi celles traitées) posées avant et après enseignement.

VIII.2.5.1 Sur le plan de la globalité des explications

Il n'apparaît pas d'évolutions très nettes dans le type d'explication utilisée pour chaque situation. Nous avons vu qu'avant enseignement le type d'explication est très contraint par le sujet de la question et souvent très spécifique à la situation proposée. Cette tendance semble très résistante à l'enseignement. Même pour des questions où l'on pouvait s'attendre à une évolution forte sur ce plan (en particulier les questions I et N sur les conditions d'existence des sons), les évolutions, quand elles existent, n'ont pas l'ampleur escomptée. Et **l'utilisation d'explications relativement générales pour des situations variées reste très rare** (que ce soit à l'intérieur d'une même question comme pour la question I ou entre questions différentes). Ceci met donc en évidence un contraste fort avec la pratique scientifique habituelle, y compris celle qui est visée par le savoir à enseigner.

Précisons cependant en quoi consistent ces quelques évolutions. Il s'agit essentiellement d'un recours plus important à l'importance du déplacement du son dans l'espace et à une utilisation plus appropriée, plus précise, et sur des situations plus variées du concept de vibration. La première de ces évolutions est bien évidemment liée à l'importance que prend le cadre conceptuel n°2 (milieu) dans les réponses après enseignement (cf. paragraphe suivant). La deuxième évolution importante, concernant l'utilisation de la vibration et des concepts qui la caractérisent (en particulier la fréquence) est un apport indéniable de l'enseignement. L'efficacité, ou au moins la fonctionnalité du concept de vibration et des concepts liés peut avoir plusieurs explications non exclusives. Deux nous paraissent ici prépondérantes et fructueuses pour améliorer les contenus d'enseignement élémentaire de la physique :

l'importance que le savoir à enseigner accorde à cette notion de vibration ;

la connaissance et l'utilisation préalable (par une partie non négligeable d'élèves) de la notion de vibration, avec laquelle les apports scientifiques et conceptuels de la physique ne rentrent pas en conflit ; le fait de donner des outils d'objectivation (et de description) pour une notion qui peut apparaître floue avant enseignement semble être une stratégie relativement efficace.

VIII.2.5.2 Sur le plan des cadres conceptuels

Nous avons déjà évoqué l'importance quelque peu surprenante que prenait le milieu de propagation après enseignement dans des explications où même la physique ne le mentionnerait pas forcément (la physique citerait plutôt comme condition première pour faire un son une vibration matérielle, en précisant éventuellement des conditions de fréquence par exemple). Nous voyons donc là l'effet de l'enseignement. Le savoir à enseigner insiste beaucoup sur la présence indispensable du milieu, propose des activités nombreuses pour mesurer la vitesse du son ou pour tenter d'illustrer ce qui se passe dans le milieu. Il n'est pas étonnant, dans ces conditions, que le milieu devienne prégnant juste après l'enseignement de cette partie du programme, pour des questions qui sont passées dans le cadre de la classe de physique.

Même si elle est moins flagrante et demanderait à être vérifiée plus largement, une autre évolution des cadres conceptuels est remarquable : la question D semble en effet révéler que le cadre conceptuel 2a (déplacement d'un point à un autre) est favorisé après enseignement au détriment du cadre conceptuel 2b (rayonnement). Nous avons constaté (cf. diagramme VIII.1-9) une inversion significative des réponses utilisant ces deux types de description de la propagation du son. Nous avons pu également révéler une tendance effective à un changement individuel de point de vue entre le premier et le deuxième passage du questionnaire. Les séquences d'enseignement semblent donc favoriser une attention particulière au trajet du son entre émetteur et récepteur, au détriment de l'idée qu'un son peut, en champ libre, se propager dans toutes les directions. Même si ceci n'était bien évidemment pas visé par le contenu à enseigner, nous pouvons interpréter ceci par l'importance des situations expérimentales rencontrées en classe où l'on s'intéresse effectivement au parcours du son d'un émetteur à un récepteur (oreille ou micro) particulier³³, dans un respect scrupuleux de la chaîne sonore.

Concernant les autres cadres conceptuels (CC1 et CC3), nous ne constatons pas d'évolution significative dans les productions des élèves.

VIII.2.5.3 Sur le plan du niveau de savoir utilisé

La question A (voir plus loin) permettra de mettre nettement en évidence une association lexicale des concepts de la physique avec le terme *son* bien plus importante après enseignement qu'avant. Nous pouvons dégager à la lumière des quelques résultats présentés ici une tendance à l'utilisation plus fréquente de concepts de la physique après enseignement, dans les réponses aux questions posées. Nous garderons à l'esprit que ce recours à des concepts scientifiques (ou des paramètres physiques) peut revêtir, juste après l'enseignement, un aspect superficiel. L'évolution du lexique utilisé est peu surprenant dans la mesure où l'enseignement introduit un certain nombre de termes scientifiques.

Cependant, cette évolution se manifeste par des changements qui nous paraissent dans certains cas plus profonds que l'adoption de traits de surface lexicaux. Nous constatons en particulier les résultats généraux suivants :

³³ Nous pensons par exemple que les mesures de la vitesse du son par mesure du "temps de vol" renforce l'idée selon laquelle le son ne va que de l'émetteur au récepteur puisqu'on ne s'intéresse alors qu'à la distance les séparant, et donc à la ligne droite fictive qui les joint.

une augmentation du recours aux propriétés physiques du son pour décrire les sons ou leur évolution (questions B et D en particulier) ;

une baisse simultanée de l'utilisation des adjectifs classiques de description des sons perçus (aigu, grave, fort, faible...) ; cette baisse est cependant faible (question D) et ces descripteurs perceptifs semblent être un recours utile même après enseignement. Notons même que pour la question B, l'augmentation de l'utilisation de propriété ne s'accompagne pas d'un relatif abandon de ce mode de description ;

une baisse légère des explications et descriptions en terme d'actions ou de redescriptions d'événements comme le choc ou le contact (questions I et N) ou impliquant directement les objets ou les propriétés des objets (question I) ;

une augmentation du recours à des phénomènes comme la propagation du son et la vibration, même si l'évolution est ici surtout repérée d'un point de vue lexical.

Signalons cependant que, pour beaucoup de questions et malgré ces tendances, **une grande partie des réponses après enseignement continuent à être formulées au niveau du monde des objets et des événements**. Les liens explicites avec un niveau de savoir plus conceptuel restent relativement peu fréquents. Comme avant enseignement, ce sont toujours les passages d'un problème général à une situation réelle précise qui semblent les plus faciles à réaliser par les élèves.

Cette accroissement de la capacité à utiliser des concepts de la physique est également observable sur les questions qui demandent de formuler une réponse plutôt en terme de concepts scientifiques (question Q et S en particulier).

La question Q permet d'illustrer les progrès importants dans la capacité de description microscopique du milieu lorsqu'il siège une onde sonore. Même si ces descriptions sont incomplètes (ne serait-ce que parce qu'elles sont statiques), il y a un réel progrès dans l'utilisation pertinente des outils conceptuels fournis par le savoir à enseigner. C'est également le cas pour la question S, pour laquelle nous constatons d'important progrès dans l'utilisation pertinente des concepts *vibration* et *fréquence*.

VIII.2.6 Les effets de l'enseignement proposé par le groupe SOC

La comparaison des évolutions selon le type de population étudiée est riche d'enseignement sur la spécificité du contenu et des méthodes proposées par le groupe SOC. Les différences sont assez significatives pour un nombre important de réponses. Sur 9 questions pour lesquelles il est possible d'effectuer cette comparaison entre avant et après enseignement, seules deux questions (B et G) ne fournissent pas de différences significatives. Rappelons que la diminution des effectifs analysés (qui résulte de la scission de la population totale en deux groupes d'importances quasiment égales) rend les résultats plus difficilement significatifs. Nous ne retenons dans cette synthèse que les

différences qui nous paraissent suffisamment importantes pour dégager de grandes tendances.

Il est en fait important de noter qu'un certain nombre d'évolutions mentionnées dans le paragraphe précédent sont largement renforcées pour la population SOC. Explicitons les points pour lesquels c'est le cas.

VIII.2.6.1 Taux d'absence d'information

De façon générale, les taux d'absence d'information baissent un peu plus pour la population SOC (lorsqu'ils diminuent pour l'ensemble de la population). Il semblerait donc que les élèves ayant suivi l'enseignement proposé par SOC soient moins démunis que les autres pour décrire ou proposer des explications. Ceci est particulièrement vrai pour les questions L, N, Q, R, S et T. La plupart de ces questions sont généralement formulées sans contexte matériel précis. Elles induisent généralement des réponses plutôt en termes théoriques ou généraux. Il semble donc que la population SOC soit davantage capable de répondre à ce niveau en utilisant des connaissances faisant plutôt partie du monde des théories et des modèles.

Ceci est confirmé par la tendance que nous pouvons observer dans le diagramme VIII.2-1 qui décrit l'évolution du jugement de difficulté pour chaque population : le questionnaire est jugé plutôt moins difficile après qu'avant enseignement pour la population SOC, évolution qui n'est pas constatée pour l'autre population.

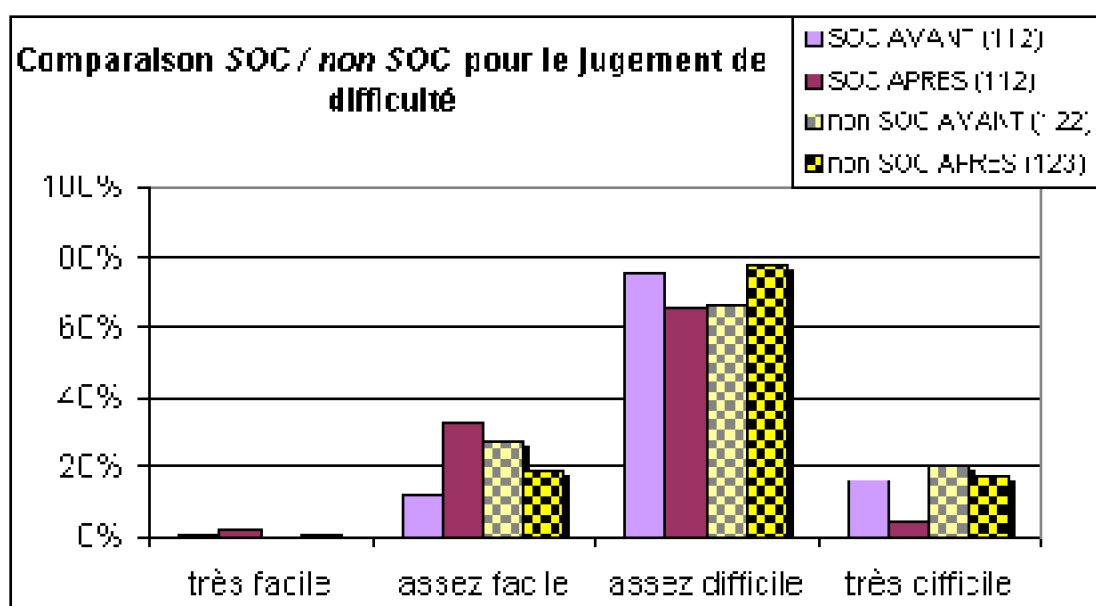


diagramme VIII.2-1 : évolution du jugement de difficulté selon la population

VIII.2.6.2 Une évolution accrue du niveau de savoir utilisé

L'évolution forte vers une utilisation plus importante des propriétés du son pour le décrire ou décrire son évolution est nettement accentué pour la population SOC. Nous voyons là encore l'influence d'un discours sur les propriétés physique du son présentées comme

telles et articulées avec les paramètres purement perceptifs des sons. Pour décrire l'évolution du son dans l'espace mais aussi au cours du temps, la population SOC utilise davantage les propriétés de l'objet physique "son" que les descripteurs perceptifs.

Dans le même ordre d'idées, les réponses à la question I, pour l'ensemble de la population, invoquent souvent même après enseignement, et malgré une baisse importante, l'action effectuée ou la propriété des objets. La baisse est bien plus importante pour la population SOC. Pour la situation des cailloux, la propriété des cailloux est même quasiment abandonnée alors qu'elle reste forte pour l'autre population (cf. diagramme VIII.1-27). Pour les deux premières situations (cailloux et brosse) les explications en terme d'action sont un peu plus délaissées par la population SOC. Par contre la progression des réponses invoquant la vibration est bien plus importante pour la population SOC. Ceci est particulièrement flagrant pour les réponses qui évoquent la vibration de tout ou partie de la source (diagramme VIII.1-24). De plus les élèves invoquant la vibration pour *les quatre* situations sont bien plus nombreux, après enseignement, dans la population SOC. **Il semble donc que l'importance donnée à la vibration en tant que mécanisme explicatif de l'existence des sons, ainsi que le statut de modèle qu'a cet outil rendent le concept de vibration opératoire pour la population SOC.**

Ce n'est pas seulement dans le recours au concept de vibration que nous constatons des différences entre les deux populations mais également dans l'utilisation de ce concept. La population SOC semble en effet utiliser facilement, lorsque c'est pertinent, les concepts de fréquence et d'amplitude (voir paragraphe suivant). C'est peut-être justement parce que la progression SOC propose, en insistant, des concepts précis pour caractériser la vibration que ce concept devient opératoire et utilisable pour interpréter des situations variées.

VIII.2.6.3 Une distinction accrue entre ce qui relève de la perception et ce qui relève des modèles

Les questions S et T sont l'occasion de pointer des différences très flagrantes dans l'utilisation pertinente des concepts caractérisant la vibration, fréquence et amplitude. Nous renvoyons à ces questions pour les détails mais nous pouvons résumer ceci en affirmant que la population SOC est globalement bien plus capable que l'autre, après enseignement, :

- . de distinguer ce qui relève de la perception et de la vibration ;
- . d'utiliser les concepts fréquence et amplitude à bon escient ;
- . de corrélérer dans le bon sens l'évolution des perceptions et l'évolution (dans le temps et dans l'espace) des concepts.

VIII.2.6.4 Une évolution contrastée de la description microscopique

Enfin, la question Q a permis de mettre en évidence des différences importantes dans la description après enseignement de l'organisation microscopique des constituants de l'air lorsqu'il y a un son. Nous y voyons bien évidemment ici l'influence du modèle microscopique proposé par le groupe SOC. Il est de plus remarquable de constater que ce modèle semble utile à la compréhension de ce qui se passe, à en juger par l'importance du nombre d'élèves de la population SOC donnant en langage naturel des précisions pour accompagner leur représentation de zones comprimées et dilatées.

VIII.2.7 Quelques remarques sur les écarts entre le son dans la vie quotidienne et le son dans le cours de physique

Nous souhaitons mentionner ici des points qui nous paraissent importants dans une démarche de réflexion sur l'enseignement élémentaire du son et qui n'ont pas été signalés auparavant, soit parce que moins importants, soit parce que n'entrant pas strictement dans les problématiques exposées dans les paragraphes précédents.

VIII.2.7.1 Ce qui fait l'identité d'un son

Nous avons remarqué à deux reprises (question B et F) que, même en restant dans le cadre de la facette perceptive du son, la définition d'un son perçu donnée par les élèves est bien différente de ce qui caractérise un son pour le savoir à enseigner. En effet, la majorité des élèves pensant que les deux personnages de la question B entendent le "même son" pensent également que l'un des deux le perçoit plus fort (proportion similaire pour la question F). Le son serait davantage défini par sa sonorité, par le timbre, et finalement par l'objet qui l'émet (c'est "le son du téléphone" ou "du chien") que par des caractéristiques physiques qui nécessitent une égalité stricte dès l'instant où le son est caractérisé par une durée, une hauteur, un niveau acoustique et un timbre (point de vue du savoir à enseigner). Ceci illustre en particulier le décalage entre l'importance que le savoir à enseigner accorde au caractère fort / faible comme élément de définition (ou au moins de caractérisation) d'un son et l'aspect secondaire qu'il revêt pour les élèves quant à l'égalité de deux sons.

Ces deux points de vue semblent d'ailleurs pouvoir coexister puisque l'enseignement n'a quasiment aucun effet sur ces points de vue. L'élève peut ainsi être capable de caractériser un son par son amplitude (ou son caractère plus ou moins fort) et être capable d'affirmer dans des situations quotidiennes qu'un "même son" peut être plus ou moins fort.

VIII.2.7.2 Importance du milieu pour l'enseignement

Nous avons déjà dit l'importance que revêt le milieu pour le savoir à enseigner, en comparaison de la place qu'il occupe avant enseignement dans les mécanismes explicatifs de l'élève. L'analyse phénoménologique du chapitre I permet de comprendre cette différence de point de vue. En effet, bien plus que l'aspect perceptif, ce sont les

phénomènes acoustiques siégeant dans le milieu de propagation qui sont l'objet principal d'étude du physicien. Celui-ci n'a par ailleurs aucun mal à établir les liens entre les événements dans le milieu (les propriétés de l'onde sonore) et les perceptions auditives. Dans une logique d'enseignement, le savoir à enseigner devrait pouvoir par contre prendre en compte cette articulation et la prédominance de la facette perceptive du son pour les élèves avant enseignement.

VIII.2.7.3 Pour l'enseignement, le son ne peut pas exister que dans l'oreille

Un point lié au précédent est la différence des lieux d'existence du son du point de vue des élèves d'une part, pour la physique d'autre part. Même si une majorité d'élèves estiment avant enseignement que le son peut exister en dehors de l'oreille (question G), ils sont environ un tiers à penser qu'il n'existe que dans l'oreille. Ceci crée un décalage de fait assez important avec le savoir à enseigner qui n'explicite pas vraiment son point de vue à ce sujet : tout se passe comme s'il était évident que le son est quelque chose qui a une existence en dehors de l'oreille. Ce point de vue du savoir à enseigner, parfaitement cohérent avec celui du savoir savant, permet par exemple de justifier facilement que les ultrasons sont bien des sons, même s'ils sont non audibles. Nous voyons au contraire que ce type de logique est loin d'être évidente pour tous les élèves de début de seconde.

VIII.2.7.4 Des points de vue inhibés

L'analyse des évolutions des réponses permet de dégager des résultats limités, certes, mais qui donnent néanmoins des tendances sur des idées ou des concepts que certains élèves utilisent avant enseignement et qui ne sont pas abordés par l'enseignement (ou très peu). Ceci peut paraître dommage puisque dans certains cas, les idées mentionnées avant enseignement ne sont pas en contradiction forte avec les connaissances de physique. L'enseignement pourrait donc s'appuyer avantageusement (comme il le fait avec le concept de vibration) sur ces idées ou au moins expliciter les différences entre les points de vue initiaux des élèves et l'analyse que le physique fait sur le même sujet.

Nous donnons deux illustrations de ce que nous venons de dire :

Avant enseignement une proportion non négligeable d'élèves utilise la notion de résonance pour décrire des phénomènes sonores (par exemple, la résonance est citée dans 20% des réponses à la question I avant enseignement). Ceci confirme d'ailleurs d'autres études à ce sujet (en particulier les travaux de Mazens avec des enfants, cf. chapitre III). Or l'enseignement n'évoque jamais cette notion connue et reconnue comme liée au son (par une partie des élèves). Il est vrai que la notion de résonance est relativement complexe en physique et que les phénomènes de résonance sonores nécessitent souvent un formalisme assez important et une compréhension accrue de la propagation des sons (notons cependant que l'expérience du tube de Kundt, assez classique dans l'enseignement pendant un temps, met en oeuvre ce phénomène). Il est cependant dommage de passer cette notion sous silence.

La question G montre que l'enseignement a tendance à inhiber la possibilité du recours à d'autres canaux sensoriels pour avoir une perception du son (en l'occurrence pour percevoir la présence d'un son en dehors de l'oreille, voir VIII.1.6.4).

Ces résultats demanderaient à être confirmés sur des échantillons plus grands, avec peut-être de nouvelles situations, pour pouvoir envisager, à ce sujet, des améliorations au contenu à enseigner

Dans conclusion :

Pris dans HDR Méheut :

Réflexion de Johsua et Dupin au sujet de la validation des recherches actions : c'est possible, c'est efficace, c'est difficile mais dans quelles conditions ? Dans l'écart entre l'enseignement habituel et l'enseignement développé dans la recherche, qu'est-ce qui fait la différence ? On rencontre là le problème du contrôle des variables et de reproductibilité des enseignements expérimentaux.

Malgré les évolutions constatées, il est difficile de dire ce qui a effectivement permis d'apprendre. Quels liens entre l'évolution des structures conceptuelles et le réseau d'activités mis en jeu entre les deux ? Quel type d'activité a permis telle acquisition ou telle évolution ?

Chapitre IX Langage et savoirs au sujet du son

Nous avons déjà évoqué à plusieurs reprises l'importance de la désignation lexicale des perceptions auditives et des concepts pour étudier les savoirs en jeu au sujet du son d'une part, pour analyser les productions et les activités cognitives des élèves d'autres part.

Ce que nous avons relevé jusqu'à maintenant à ce sujet se résume aux quelques points suivants :

Le son en général est un sujet qui permet une diversité extrême d'usages lexicaux, tant au niveau de la description des sensations auditives que des phénomènes physiques en jeu. Chion (1998) relève fort bien ce champ des possibles langagiers et affirme d'ailleurs que les potentialités de notre langue à ce sujet sont largement sous-exploitées dans la pratique courante. Nous pouvons ajouter que, comme pour d'autres sujets, la métaphore joue un rôle majeur dans cette diversité (Lakoff et Johnson, 1985) (chapitre I).

Le savoir scientifique (et en particulier le savoir à enseigner) utilise de façon classique des supports langagiers pour désigner des concepts précis. Bien que la terminologie scientifique puisse emprunter régulièrement à l'usage courant ou à d'autres disciplines, l'usage scientifique d'un concept ne supporte pas de "dérapage sémantique"

(Gentilhomme, 1994). Le concept est entièrement déterminé par sa définition (qui précède toujours l'utilisation du concept) alors que la notion qui partage le même signifiant autorise des usages plus flous dans l'usage quotidien. Les différences majeures entre notion et concept ont été débattues au chapitre III.

Le savoir scientifique au sujet du son semble un sujet typique pour étudier l'articulation entre notion et concept : nombre de termes désignant des concepts sont des emprunts au langage courant (*vibration, intensité, fréquence, émettre, recevoir, hauteur...*) ou ont un usage partagé avec d'autres branches de la physique ou de la science (*volume, milieu, résonance* par exemple).

La verbalisation et la production écrite jouent un rôle majeur dans la construction des connaissances scientifiques. Cette approche vygotkienne est maintenant assez bien partagée et l'ingénierie présentée dans la partie B l'a non seulement mise en pratique mais a aussi permis d'illustrer le rôle central que ces phases, peu fréquentes dans l'enseignement scientifique, pouvaient jouer (Baudry et al., 1998).

Le contexte nous paraît donc tout à fait favorable à une étude complémentaire sur le sens que les élèves peuvent attribuer à certains termes scientifiques avant enseignement et sur les usages qu'ils privilégient.

Ce chapitre est donc une contribution tout à fait modeste aux nombreux travaux de didactique qui prennent en compte le rôle de la langue naturelle dans les processus d'enseignement et d'apprentissage. Ces travaux considèrent souvent le langage naturel quotidien comme un handicap, voire un obstacle à la construction des connaissances.

Les travaux s'inscrivant réellement dans une articulation et un apport mutuel des deux disciplines didactique et linguistique restent assez rares. L'important travail de Gérard Collet nous paraît à ce titre remarquable et original (Collet, 1996). Il constitue pour nous une référence essentielle et a largement inspiré les expériences que nous avons menées.

Reste qu'il n'est pas question pour nous de présenter ce chapitre comme une étude *en linguistique*. Les repères théoriques seront relativement peu développés et notre travail n'a pas la portée de celui de Gérard Collet. Nous nous inscrivons davantage ici dans une démarche d'application, dans le cas du domaine sonore, de ces réflexions. Nous mettrons donc l'accent dans ce chapitre sur la présentation de l'expérience réalisée et de certains résultats.

Ces résultats viendront en partie confirmer les tendances dégagées dans le chapitre précédent. Ils seront surtout un moyen de mieux connaître l'articulation entre notion et concept, les interactions entre des contextes d'utilisation issus de différentes branches de la physique et la signification préalable pour les élèves des termes qui sont appelés à devenir un concept scientifique dans une phase d'enseignement.

IX.1 Cadre théorique et hypothèses

Nous exposons ici quelques repères théoriques relativement classiques qui permettent de justifier les choix méthodologiques que nous avons adoptés. Il ne s'agit en aucun cas de s'intéresser à proprement parler, comme en linguistique, au fonctionnement de la langue. Nous nous bornons ici à étudier les aspects de la langue liés à la signification et à l'usage des mots et aux connaissances que nous pouvons en tirer sur la construction des connaissances.

IX.1.1 La langue comme support de connaissances et de raisonnements

Collet (1996) a largement mis en évidence l'intérêt d'une approche linguistique du développement des connaissances et des processus cognitifs. Il est maintenant assez largement reconnu que la langue est non seulement le moyen d'exprimer des connaissances mais qu'elle contraint également la construction et l'expression de ces connaissances. Il est également admis par les membres de différentes communautés (psychologie cognitive, psycholinguistique, linguistique mais aussi didactique) que les mécanismes cognitifs sont orientés ou contraints par la langue.

Sur un sujet scientifique où la représentation de phénomènes invisibles est cruciale (cas du son), nous remarquerons également le statut à part de la langue naturelle en tant que système sémiotique, par son rôle discursif (Duval, 1995, p.9). Comme c'est le cas pour le sujet qui nous concerne, la confrontation (éventuellement la "traduction") avec d'autres registres sémiotiques, non discursifs, est probable et fréquente. Outre son rôle d'énonciation de perception, la langue naturelle permet aussi l'apprentissage de représentations sémiotiques jugées pertinentes ou efficaces pour l'appréhension d'un concept. Il nous paraît ainsi important de tester la capacité des élèves à passer d'un registre langagier à un registre iconique.

Dans le cas qui nous intéresse, nous devons également mentionner les contraintes que fait peser la langue sur l'activité de modélisation. Collet (1996) expose en détail cet aspect puisqu'il étudie les activités de modélisation sur l'énergie, en prêtant une attention toute particulière aux mécanismes d'appariements entre concepts du modèle et éléments du monde sensible. Dans notre cas, l'appariement semble poser moins de problèmes que dans le cas de l'énergie (en particulier le repérage des émetteurs, récepteurs et milieu semble être, comme nous l'avons déjà dit, une activité relativement facile). Dans le cas du son, c'est surtout la référence aux perceptions sonores qui est problématique. L'approche phénoménologique nous permet de rappeler que les perceptions auditives et les émotions qui peuvent en résulter peuvent être extériorisées grâce à différentes manifestations : geste, attitude faciale, mais surtout langage naturel. Pour mieux comprendre les relations entre les phénomènes et les sensations perçues nous devons donc mener des investigations sur les termes du langage utilisés, tant pour rendre compte des émotions que pour décrire et interpréter les événements, notre hypothèse étant que ces utilisations peuvent s'influencer mutuellement. Pour cette étude, la diversité des traits sémantiques des descripteurs perceptifs pose le problème de leur articulation avec les concepts de la physique. Étudier précisément les contenus lexicaux des éléments du modèle d'une part, des descripteurs perceptifs d'autre part pourrait quoi qu'il en soit permettre d'améliorer les conditions propices à la modélisation.

L'activité de modélisation, constructrice de sens de notre point de vue, se fait généralement à l'aide de la langue. Les informations scientifiques (contenues dans le savoir à enseigner) sont le plus souvent fournies sous forme écrite (en particulier sous la contrainte de la transposition didactique). Pour un certain nombre de linguistes, en étudiant le langage, nous étudions aussi la structure de la pensée (Jackendoff, 1990). Cette liaison semble recouvrir deux facettes :

Les formes langagières utilisées, les structures lexicales mises en pratique peuvent refléter l'activité cognitive de l'apprenant. L'évolution de ces usages et mécanismes peut alors permettre d'évaluer l'apprentissage, ou tout au moins le niveau de complexité des raisonnements effectués.

Le fonctionnement propre de la langue peut induire les raisonnements et la nécessité même de verbaliser un résultat ou un raisonnement contraint celui-ci. La syntaxe liée aux termes du modèle (valence, sèmes inhérents à la base lexicale d'un verbe par exemple) pourra induire certains jugements de l'apprenant sur la valeur de vérité à accorder à certaines hypothèses ou affirmations.

Nous avons eu l'occasion de mesurer les effets de tels points de vue dans l'analyse des productions des élèves (chapitre précédent) puisque c'est souvent à partir des termes (et en tenant compte des tournures syntaxiques) que nous avons codé leurs réponses.

Collet (1996) soutient une thèse qui ***"vise à établir que la langue naturelle, depuis les contenus qu'elle véhicule jusqu'à l'influence de ses mécanismes propres, est insuffisamment prise en compte, et qu'une part des conceptions et des raisonnements naturels y trouve sa place"*** (p.10). C'est dans cette perspective que se situe l'expérimentation que nous allons présenter. Nous ne donnerons cependant que quelques pistes de réflexion pour élaborer un travail futur que nous n'avons pas réalisé ici : observer l'influence des résultats obtenus sur l'analyse des processus de modélisation et d'apprentissage et mettre en évidence les contraintes exercées par de telles caractéristiques linguistiques sur l'activité de modélisation.

Après ces points de vue très généraux et avant d'exposer des résultats, nous détaillons deux points particuliers qui illustrent notre démarche et les aspects spécifiques que nous allons observer.

IX.1.2 La construction des concepts scientifiques : notion et concept

Nous accordons une importance toute particulière à la distinction déjà évoquée entre notion et concept (cf. § III.1.1.3). En effet, les textes du savoir à enseigner s'appuient généralement sur des termes spécifiques du discours scientifique mais appartenant cependant au langage courant (par exemple vibration, voire même fréquence). Le bénéfice de cette transformation de la notion en concept recouvre aussi un inconvénient puisque l'opération consiste du même coup en une redéfinition des termes. Dans le processus nécessaire de construction de sens auquel est confronté l'élève, ceci pèse forcément comme une contrainte.

Le diagnostic suivant de Gentilhomme (1994) nous paraît correspondre parfaitement à certains aspects du savoir scientifique au sujet des phénomènes sonores :

"Comme tels, les mots de la langue courante utilisés en physique ont déjà un signifié. Celui-ci ne sera pas balayé par le concept scientifique introduit mais lui servira de fondements, et s'y superposera, infléchissant sa signification et assouplissement son fonctionnement".

Le problème peut devenir important lorsque la multiplicité de traits sémantiques devient grande (ce peut être le cas avec *volume*, *aigu* ou *grave* par exemple). Comme l'a fait remarquer Laborde (1982), une définition institutionnelle monosémique des mots (y compris à l'aide du modèle) n'évacue pas les faits de polysémie, cette polysémie pouvant être inhérente au terme ou relever d'idiolectes individuels. Ce fait est peut-être renforcé lorsqu'il concerne des mots désignant des entités abstraites liées au monde sensible (par exemple *aigu*, *grave*, *fort* dans le cas de la perception auditive). Ceci met en cause l'hypothèse de Vygotski (1934), selon laquelle pour apprendre un concept scientifique on se sert de concepts spontanés associés au mot. Les concepts sont certes "encapsulés" (*embodied*) dans les mots (pour reprendre l'expression de Vygotski), mais la physique ne peut pas négliger que ces mots n'arrivent pas vierges de toute signification et qu'ils possèdent déjà un signifié qui est parfois très éloigné de celui du concept à construire. Quand bien même, la polysémie est reconnue, l'enseignement ne spécifie pas toujours le sens adopté par la discipline (le contexte étant sensé suffire). Pourtant, **"ce sont tous ces termes dont on ne pense pas toujours à préciser le sens exact en situation qui créent le plus de difficultés aux élèves"** (Baudry et al., 1998, p.86). Comme nous le verrons, de nombreux termes du savoir à enseigner au sujet du son ont une telle polysémie. Nous nous intéresserons plus particulièrement à certains d'entre eux.

Par exemple, si les résultats déjà exposés permettent d'affirmer que le mot *vibration* peut être associé spontanément au domaine sonore, il reste à étudier :

les traits sémantiques, ou sèmes, sur lesquels peut se faire l'acquisition du concept scientifique présent dans le savoir à enseigner (par exemple le trait "aller-retour" est favorable pour *vibration*) ;

l'influence et l'importance relatives des autres traits sémantiques du terme.

Le questionnaire détaillé dans les deux chapitres précédents permet de donner des éléments de réponses limités à ces interrogations. Les investigations évoquées dans le présent chapitre trouvent alors leur justification pour avancer sur cette piste de recherche.

Nous devons alors chercher à savoir si les interactions entre les traits sémantiques de la notion et ceux du concept sont favorables à l'apprentissage (auquel cas elles devront être exploitées) ou défavorables (auquel cas, l'enseignement devra prendre en charge les problèmes de compatibilité et "d'interférence" potentiels) : par exemple si le terme de vibration semble donner lieu à des interactions plutôt favorables (par proximité entre les traits de la notion et du concept), nous estimons qu'il n'en est probablement pas de même avec le terme *charge* (la charge électrique n'a *a priori* que peu d'attributs de la

notion de charge).

Gentilhomme (1994) estime que **"le chercheur utilise conjointement les deux signifiés, conceptuel et notional. Si le premier est le seul qui apparaît explicitement dans l'élaboration d'un discours rigoureux [...], implicitement dans la genèse de sa pensée, le chercheur prend appui sur un substrat notional"** (p.33). Si c'est là un objectif pour l'élève, celui-ci a un rapport cependant très différent au signifiant. C'est la capacité à utiliser le concept sans être gêné par la notion qui est à acquérir pour l'élève. Lorsque ce sera le cas, l'étendu de la notion, les traits sémantiques attachés à d'autres contextes pourront enrichir le concept. Nous pouvons même reconnaître avec Gentilhomme (1994) que le **"fonctionnement d'un terme technoscientifique exige la coprésence d'une notion et d'un concept"**. S'il est pratique et utile, pour le spécialiste, d'utiliser la notion pour la circonscrire à la discipline, ceci n'est pas forcément le cas pour l'élève. Dans les cas d'écart sémantique relativement fort entre la notion et le concept, l'enseignement doit veiller à ce que cette coprésence ne soit pas source de confusion, en permettant la construction de sens du concept dans de bonnes conditions. Pour ceci, il faut non seulement être capable de repérer les traits sémantiques associés à la notion mais également ceux qui sont associés au concept scientifique.

Nous pourrions alors distinguer les cas où la construction du concept à partir de la notion présente un contexte favorable³⁴ (il semble par exemple que ce soit le cas de *vibration*) des cas où la relation est plus conflictuelle et prête davantage à confusion (ce pourrait être par exemple le cas de *hauteur* ou *volume*).

Dans un cas comme dans l'autre il convient de porter un intérêt particulier aux termes qui sont impliqués (en tant que concept) dans des disciplines scolaires différentes ou dans des branches différentes d'une même discipline. Si, pour le physicien, la notion d'*intensité* est le point de passage qui établit une relation entre les deux concepts bien distincts d'*intensité électrique* et d'*intensité acoustique*, l'identité du terme risque de poser bien davantage de problèmes pour l'élève puisqu'il s'agit alors de construire un sens à l'un ou l'autre des concepts.

S'il est évident qu'une analyse lexicale doit être menée pour mieux connaître ces effets impliqués dans les processus d'apprentissage, il ne faut pas non plus négliger les aspects syntaxiques.

IX.1.3 Approches lexicales et syntaxiques

Il est indéniable que le lexique "porte" les concepts. Il convient donc, pour mieux comprendre les interactions mutuelles entre usage de la langue d'une part et construction des connaissances et raisonnements d'autre part, d'accorder une importance spécifique au contenu lexical.

Ce contenu lexical influence fortement les mécanismes cognitifs des élèves (dans une certaine mesure il peut également les révéler). Les traits sémantiques attachés à un terme sont fondamentaux mais différents points de vue théoriques ont abordé cette vaste question. La classification des mots en catégories a par exemple été constatée depuis

³⁴

Il reste alors à savoir sur quels points d'appui sémantiques basés la construction du concept.

longtemps. Kleiber (1990) traite du problème en indiquant que la question est éminemment sémantique : "*A une interrogation telle que* quels sont les critères qui président au regroupement d'un ensemble d'occurrences sous un même chapeau dénominatif ? *fait écho la question* quels sont les critères qui décident de l'appartenance d'une occurrence à une catégorie ?" (p.17). Ceci revient donc à étudier les traits sémantiques d'un terme déterminants pour appartenir à une catégorie. Cette catégorisation, en devenant multiple ou hiérarchique, devient essentielle pour la définition des termes techniques ou scientifiques et pour le repérage, de fait, de leur traits sémantiques (Guilbert, 1973). On voit que si un terme connu avant l'enseignement par l'élève est affecté à une catégorie, les traits sémantiques que cette appartenance induit ne seront pas forcément compatible avec le concept de même signifiant.

Nous pouvons également mentionner à ce sujet l'importance des structures métaphoriques dans ces phénomènes de catégorisation. Dans l'ouvrage déjà mentionné qu'ils y consacrent, Lakoff et Johnson (1985) décrivent bien comment la métaphore consiste à catégoriser et à lier des entités lexicales par certains traits sémantiques. Par exemple, la métaphore, dans notre cas, "le son est une substance matérielle molle" attribue au son des traits sémantiques de la substance matérielle molle³⁵.

Si nous ne séparons donc pas le lexical du sémantique, nous ne négligerons pas non plus l'influence des formes syntaxiques. La structure syntaxique permet de relier en particulier les connaissances véhiculées par la langue et le fonctionnement propre de celle-ci (Collet, 1996). Les formes syntaxiques sont non seulement révélatrices des mécanismes cognitifs mais aussi de l'éventuelle difficulté à construire du sens pour un concept. Le degré de plausibilité attribué à un énoncé ou son caractère scientifique peuvent être dus à sa forme syntaxique. Guilbert (1973) signale en effet à ce sujet que "***la spécificité du terme scientifico-technique se marque aussi [...] par son insertion syntaxique***" (p.17).

Sans entrer davantage dans les détails théoriques, nous donnons un exemple pratique basé sur l'observation de séquences d'enseignement au collège. Baudry et al. (1998) constatent ainsi : "De nombreuses difficultés linguistiques sont à mettre en relation avec une autre opération intellectuelle très importante au collège, *l'abstraction*". Il s'agit alors le plus souvent de nominaliser. La description de l'action se fait au niveau du concret alors que la nominalisation oblige à l'abstraction : dire que la corde de guitare vibre vite ce n'est pas la même chose que de dire que la vibration de la corde se fait de façon très rapide. Il faut ensuite utiliser cette nominalisation. Baudry et al. (1998) indique par exemple que l'utilisation de la nominalisation en sujet est plus difficile qu'en complément d'objet.

Ces développements théoriques ont permis de dégager ce qui devra être observé et analysé dans notre recherche :

les traits sémantiques, ou sèmes, attribués à certains concepts utilisés entre autres

³⁵ Cet exemple n'est pas le fruit du hasard mais a quelques fondements expérimentaux. Nous avons vu combien cette métaphore semblait opératoire pour bon nombre d'élèves (cf. chapitre III en particulier).

dans le domaine sonore³⁶ ;

les contextes d'utilisation reconnus comme adaptés au terme étudié (pour repérer le type d'usage "quotidien" et les usages scientifiques acceptés) : dans son exploration des sens possibles, quel emploi est reconnu comme plausible ou pertinent pour l'élève ?

Les méthodes mise en oeuvre pour mener à bien ces recherches seront détaillées dans le paragraphe IX.3.

Dans l'immédiat nous revenons sur l'analyse lexicale permise par le questionnaire du chapitre VII passé avant et après enseignement.

IX.2 Premiers résultats issus de l'investigation sur les systèmes explicatifs

Rappelons que la première question du questionnaire présenté précédemment n'a pas été discutée jusqu'à maintenant parce qu'elle concerne justement les associations lexicales que les élèves font spontanément avec le terme *son*. Il est bien évident que cette question est d'une nature très différente des autres questions du questionnaire et qu'elle constitue un cas à part. Elle n'a pas pour but de donner des renseignements sur les mécanismes cognitifs en jeu dans des phases de résolution de problèmes concernant le son. Elle permet juste d'établir le contour de l'univers conceptuel des élèves concernant le son avant enseignement. Elle permet ensuite d'évaluer l'évolution de cet univers conceptuel du fait des séquences d'apprentissage suivies et de comparer cette évolution selon l'appartenance aux classes SOC ou non. Nous présentons donc naturellement ces résultats dans ce chapitre.

De même nous donnerons un bref rappel des usages et évolutions lexicales donnés au chapitre VIII lors de la présentation des résultats question par question.

IX.2.1 Résultats de la question A

IX.2.1.1 Énoncé

Citez 4 mots que vous associez au son.

IX.2.1.2 Présentation

Nous cherchons ici à explorer le lexique que les élèves associent au terme *son*. Nous relevons donc l'ensemble des mots ou syntagmes qui correspondent aux unités significatives associées spontanément au son. Les recherches en linguistique sur l'accès lexical (procédures par lesquelles les mots sont retrouvés en mémoire pour être reconnus

³⁶ Pour signifier des associations spontanément faites, nous avons choisi d'utiliser le terme "signifiantes associées spontanément au son". Les recherches en linguistique sur l'accès lexical (procédures par lesquelles les mots sont retrouvés en mémoire pour être reconnus

³⁷ Nous utiliserons dans la suite "mot" ou "terme" pour désigner les réponses fournies même s'il s'agit plus précisément, dans certains cas, de syntagmes.

ou produits) ont mis en évidence deux processus importants dont il faut avoir conscience dans le cadre de cette étude. D'une part, l'effet de fréquence (plus un mot est fréquemment utilisé par une personne, plus son accès est rapide), d'autre part l'effet d'amorçage (si une personne cite un mot, l'accès à un mot sémantiquement associé est plus rapide). En demandant 4 mots, on peut donc avoir ici des effets d'amorçage successifs. Ainsi les termes de fin de liste peuvent dans certains cas être corrélés davantage au terme précédent (par association) qu'au terme son. On n'oubliera pas non plus que l'accès à un mot est évidemment contraint par son sens (on accède aussi à son sens) (Ducrot et Schaeffer, 95).

Le contexte scolaire du cours de physique intervient évidemment largement pour une question ouverte qui permet une assez grande spontanéité, tout au moins pour le passage initial. On peut s'attendre à une évolution des réponses avant / après relativement importante du fait d'un enseignement de sciences physiques de quelques mois sur ce sujet. Cette question permet de mieux identifier d'une part le champ lexical associé à *son* par les élèves avant enseignement, d'autre par l'influence du savoir à enseigner de seconde sur celui-ci. Ceci doit pouvoir confirmer certaines tendances évolutives dégagées dans le chapitre précédent.

Nous pouvons nous livrer à une rapide analyse *a priori* du lexique associé au son dans un dictionnaire par exemple. Ainsi, le Petit Robert 1993 distingue l'aspect sensoriel de l'aspect physique et fournit donc en relation avec ces deux facettes une liste de mots associés (cf. annexes). Pour ce qui concerne la sensation, nous avons *bruit, audition, cri, voix, résonner, sonore, sonorité, sonnerie* ou encore *timbre* (liste non exhaustive) ; liés à l'aspect physique nous trouvons *fréquence, intensité, bruit, décibel, timbre, ton, note, tonalité, hauteur, vitesse, microphone...* On remarquera le léger décalage entre ce champ lexical et celui du savoir à enseigner correspondant : *amplitude*, par exemple, n'y figure pas, pas plus que *longueur d'onde, récepteur* ou *haut-parleur*. Nous avons délibérément choisi ici de citer, parmi les termes présents dans la définition de *son* donnée par le dictionnaire, ceux que nous allons également rencontrer dans les réponses des élèves. La diversité des termes cités dans le dictionnaire donne avant même d'étudier les réponses une idée de la richesse et des possibilités d'usage du terme *son* dans la vie quotidienne.

IX.2.1.3 Résultats essentiels

Variété des termes Les termes cités sont très variés : 201 mots différents cités avant (sur 988 productions totales puisque chaque élève fournit 4 mots), 155 après (sur 1004 productions totales). Cette diversité des mots cités chute donc considérablement après enseignement. Par contre, les occurrences sont mieux réparties après enseignement : après enseignement 15 mots dépassent 8% (cités plus de 20 fois), 10 seulement avant. Plus de la moitié des mots cités ne le sont qu'une fois, par un seul élève (119 sur 201 avant, 90 sur 119 après). Si l'on comptabilise seulement les 38 termes qui apparaissent plus de 10 fois (en comptant avant et après), on couvre 82% de la production totale. Ainsi 20% des mots cités couvrent 82% de la production globale. C'est sur ces 82% (38

termes) que nous travaillons à partir de maintenant.

Une prédominance de bruit et musique Avant enseignement, *bruit* est cité dans 59% des cas (dans la plupart des cas en première position), *musique* dans 48%. Si ces deux pourcentages restent relativement forts (respectivement 24% et 21,5%) après enseignement, ils sont dépassés par 3 termes : *vibration* (31%, multiplié par 3), *fréquence* (35,5%, multiplié par 7) et *amplitude* (25%, quasi inexistant avant puisque cité une seule fois). On voit là l'effet de l'importance donnée par l'enseignement de sciences physiques au concept de vibration et aux concepts qui le caractérisent. L'effet de l'enseignement sur le champ lexical lié au son juste est assez remarquable. Le diagramme IX-2-1 fournit l'évolution des 8 termes les plus cités avant enseignement.

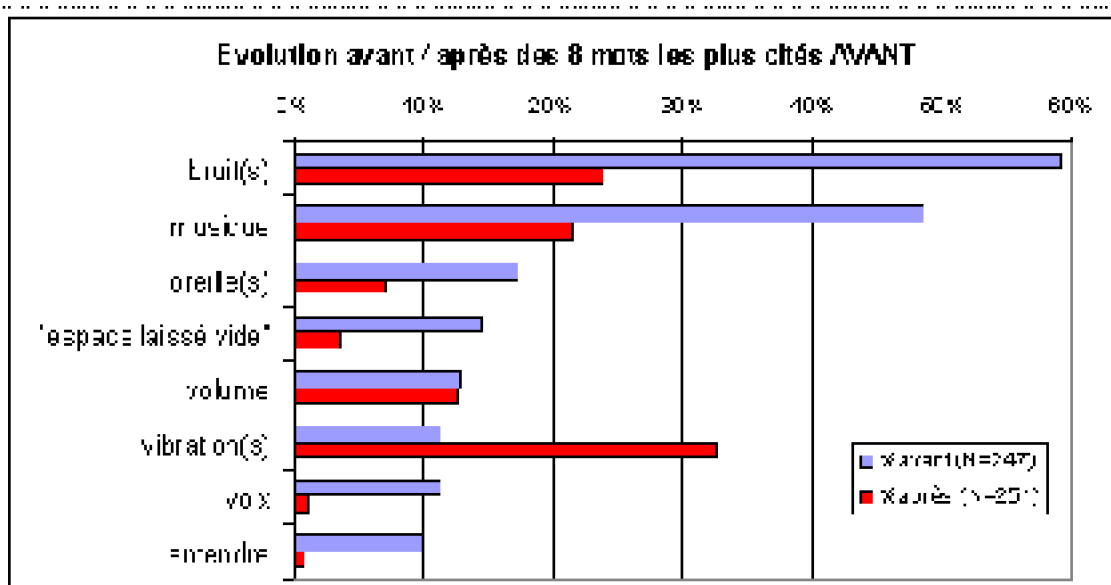


diagramme IX-2-1 : question A, évolution des citations des 8 termes les plus cités avant enseignement

Termes cités après enseignement Comme nous l'avons déjà dit, les occurrences sont mieux réparties entre différents mots après enseignement. Pour prendre en compte ceci, nous allons nous intéresser aux 17 mots qui dépassent 7% après enseignement, qui sont par ordre décroissant : *fréquence*, *vibration*, *amplitude*, *bruit*, *musique*, *haut-parleur*, *onde*, *propagation*, *volume*, *émetteur*, *intensité*, *récepteur*, *micro*, *aigu*, *hauteur*, *grave*, *onde sonore* (diagramme IX-2-2). On retrouve parmi ces 17 mots **9 des 10 radicaux de la liste L**³⁸ (qui en comporte 11 mais on ne compte pas ici le mot *son*). Seul le verbe *résonner* (ou le substantif *résonance*) est cité par moins de 7% des élèves (cité 1 fois seulement après enseignement). Ceci est le signe de l'absence totale de ce terme dans le discours supportant le savoir à enseigner. Nous avons donc ici un indice fort de l'apparition dans le lexique associé au son des termes de la liste L suivants :

³⁸ Voir chapitre VII, § VII.2.5.

fréquence, vibration, propagation, émetteur, intensité, récepteur. Ceci contribue à justifier l'investigation plus spécifique que nous avons menée à leur sujet à l'aide de l'expérimentation détaillée dans ce chapitre.

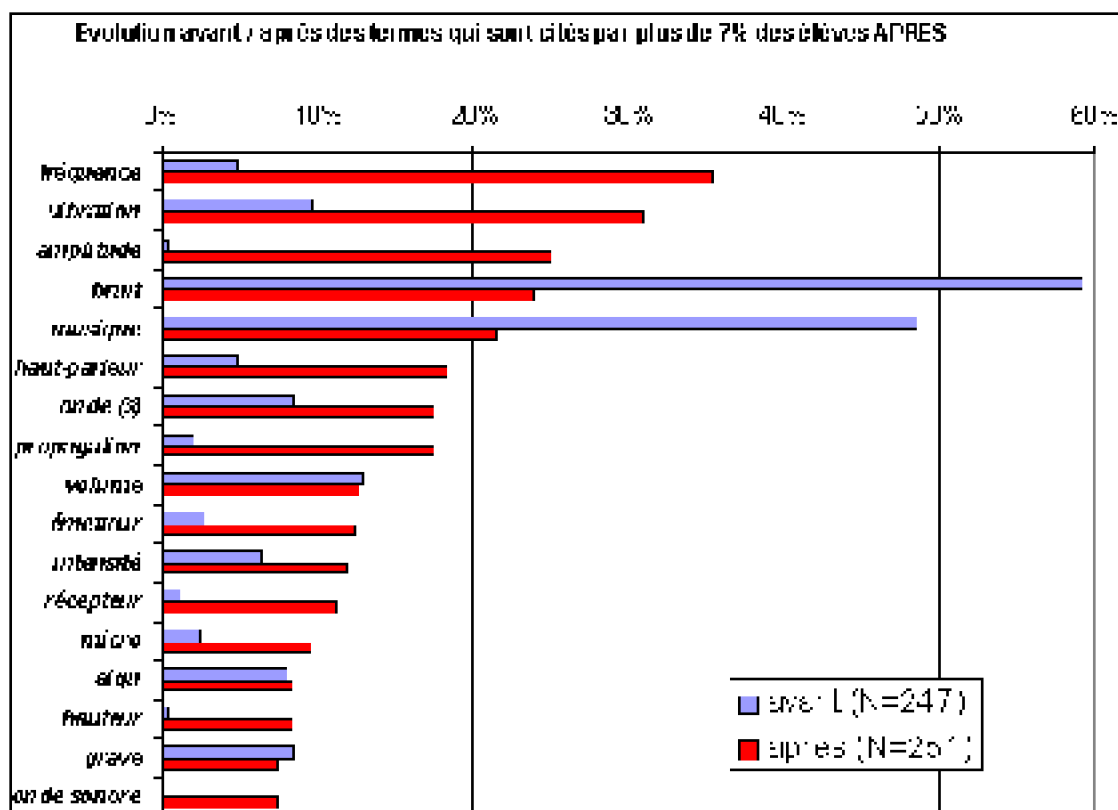


diagramme IX-2-2 : question A, évolution des citations des termes les plus cités après enseignement.

Peu d'évolution pour les descripteurs quotidiens aigu , grave et volume Notons que, contrairement aux 6 mots de la liste L mentionnés dans le paragraphe précédent, les termes *aigu*, *grave*, et *volume* voient leur usage quasiment constant. Il est d'ailleurs remarquable de constater que ce sont **les seuls** dans ce cas (parmi les 17 du diagramme IX-2-2). Ces mots sont sans doute, parmi les 10 de la liste L, les plus utilisés dans le langage quotidien. **L'enseignement ne semble donc avoir que peu d'effet sur l'usage de ces termes en référence au son.** Remarquons enfin que

d'autres termes ont une progression importante entre les deux passages : *haut-parleur*, *onde(s)*, *micro(phone)*, *hauteur*, *onde sonore*. Ils désignent tous soit des objets soit des concepts fortement liés à la physique

IX.2.1.4 Comparaison SOC / non SOC

Les grandes tendances des résultats ci-dessus sont logiquement respectées dans les deux sous-groupes étudiés :

bruit et *musique* sont prédominants avant enseignement pour les deux sous-groupes et restent beaucoup cités après enseignement ;

les termes liés à la physique, en particulier les concepts présents dans le savoir à enseigner, sont plus fréquents après enseignement.

Mais des nuances importantes méritent d'être signalées et analysées. Elles sont regroupées dans le diagramme IX-2-3 et commentées ci-dessous.

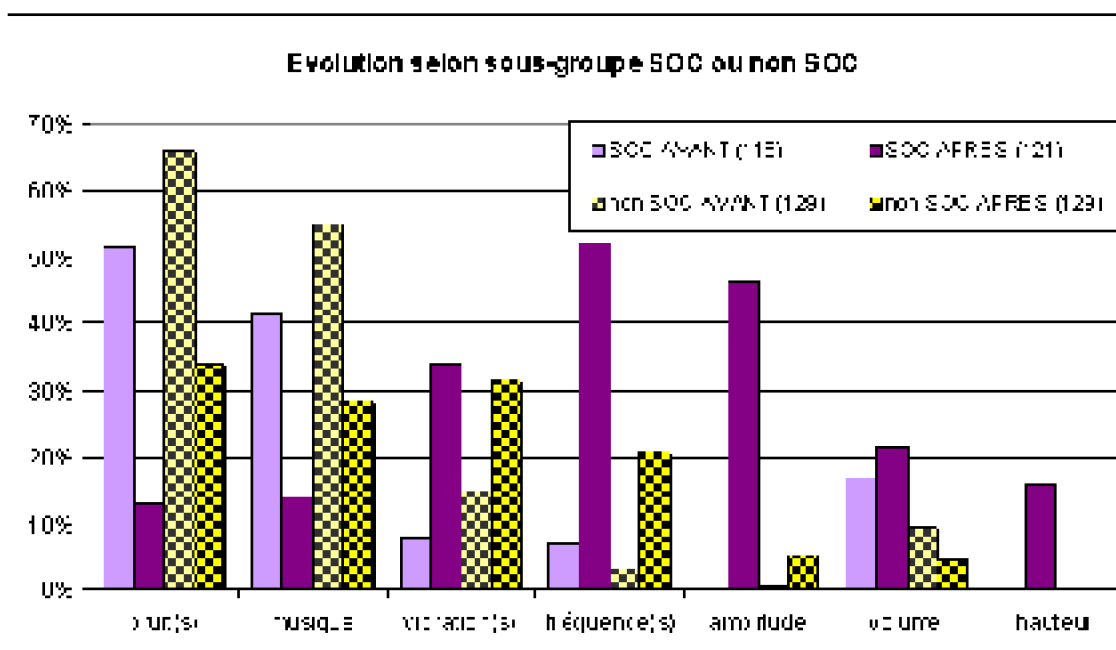


diagramme IX-2-3 : question A, évolution selon la population

Évolution de fréquence et amplitude Les différences entre les deux sous-groupes sont considérables pour les deux termes *fréquence* et *amplitude*. Pour *fréquence*, le pourcentage de citation passe de 7 à 52% pour la population SOC alors qu'il n'évolue que de 3 à 21% pour l'autre sous-groupe. Quant au terme *amplitude* (quasi inexistant avant enseignement), il n'est employé après enseignement quasiment que par la population SOC (46% contre 5%). Ces deux observations sont à rapprocher des

résultats des questions S et T qui montrent aussi une utilisation à bon escient de ces deux concepts bien plus importante par la population SOC. Ceci confirme le résultat dégagé au chapitre précédent (§ VIII.2.6.2) au sujet de la spécificité de l'enseignement proposé par SOC sur ce point : ce n'est pas tant l'importance donnée au concept de vibration qui caractérise cet enseignement mais plutôt le fait de présenter comme fondamentale la possibilité de décrire cette vibration avec des concepts précis, en relation avec les perceptions auditives.

Bruit et musique Les mots *bruits* et *musique* voient leur occurrence chuter bien davantage pour la population SOC. Ils sont dépassés par 6 termes (*fréquence*, *amplitude*, *vibration*, *volume*, *onde(s)*, *hauteur*) après enseignement, alors qu'ils restent les deux plus cités pour la population non-SOC.

Volume et hauteur Le terme *volume* a une dynamique croissante pour la population SOC, décroissante pour la population non-SOC. Le terme *hauteur* cité uniquement après l'est seulement par des élèves ayant suivi la progression SOC. Là encore, ceci peut être vu comme le résultat de l'importance attribuée par le contenu élaboré par SOC aux liens entre *fréquence* et *hauteur* et entre *amplitude* et *niveau sonore* (en insistant sur le respect scrupuleux de ces termes).

Mots pour lesquels on n'observe pas de différence notable SOC / non-SOC

Il n'y a pas de différence significative pour *vibration(s)* même si la progression est plus importante pour la population SOC. Nous avons vu que c'est surtout l'usage de *fréquence* et *amplitude* qui permet de distinguer le comportement des deux populations.

Nous n'observons quasiment pas d'évolution pour *émetteur* et *récepteur*. Ceci tend à confirmer que la chaîne sonore (dont récepteur et émetteur sont deux éléments) est un outil qui n'est pas réservé au contenu proposé par SOC.

Enfin, le terme *propagation* ne subit que faiblement l'effet de la discrimination entre les deux populations : son évolution est légèrement plus importante pour la population non-SOC (de 2% à 22% contre 4% à 12% pour la population SOC). Là encore, le concept de propagation n'apparaît en rien comme spécifique du contenu SOC.

Les données chiffrées de ces deux derniers points sont résumées dans le diagramme ci-dessous.

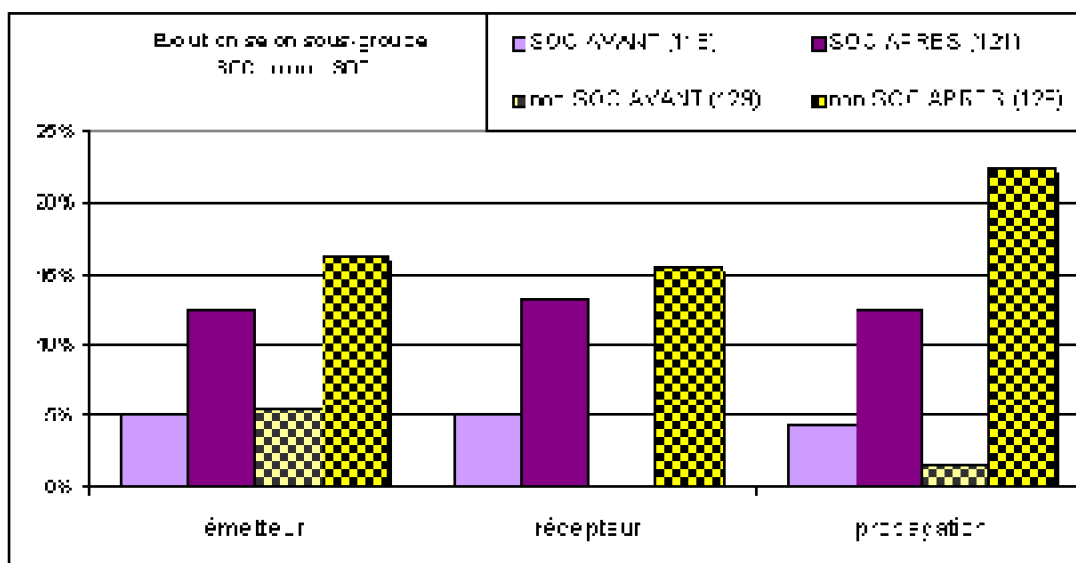


diagramme IX-2-4 : question A, évolution selon la population pour les termes émetteur, récepteur et propagation

IX.2.2 Rappels sur les évolutions lexicales dans les productions des élèves

Les évolutions d'usage lexical dans les réponses aux questions sont en grande partie conforme à ce que nous venons d'observer. L'émergence des termes de la liste *L* est nette, même si les usages sont contrastés. Il est à noter que les mots étudiés sont globalement assez peu utilisés avant enseignement, ce qui révèle qu'ils appartiennent plutôt à un lexique spécialisé et relativement peu quotidien (exception faite de *aigu*, *grave*, *volume*, et évidemment *son*). Nous avons également constaté une forte progression de l'usage de *vibration* ou *vibrer* et, pour le groupe SOC, de *fréquence*. Enfin, *propagation* est nettement plus utilisé après enseignement, ceci étant dû en grande partie à l'utilisation du syntagme *milieu de propagation*. Nous notons également, sur certaines questions, une évolution importante des usages d'*émetteur* et de *récepteur* (ou dans une proportion bien moins importante, des verbes qui en dérivent).

IX.3 Méthodologie

IX.3.1 Quelques réflexions au sujet du domaine sonore et choix des termes étudiés

Chion (1998) signale l'extrême richesse de la langue française pour décrire les sons perçus. Les mécanismes qui conduisent à l'utilisation dans le domaine sonore sont variés : nominalisation (bourdonnement, crépitement...), métaphore spatiale (son descendant, son qui prend du volume...), métaphore visuelle (son coloré, son clair...), métaphore animiste (son vif...) ou matérielle (son lisse, râpeux...) sont quelques exemples, sans même parler de l'utilisation du lexique émotionnel. Nous voyons là également comment ces constructions linguistiques peuvent induire des points de vue variés sur la nature des

sons.

Cette diversité est totalement "bridée" par la description scientifique des perceptions perçues et des phénomènes sonores en général. Le vocabulaire normalisé de la physique à ce sujet est la marque de sa spécialisation.

Il convient dans notre cas, et pour tenter de donner quelques éléments de réponses aux problèmes soulevés dans le paragraphe IX.1, de justifier le choix des termes que nous avons choisi d'étudier.

Le terme son s'est imposé, dans l'articulation avec les investigations menées sur la nature du son pour les élèves. Nous l'avons préféré à *bruit*, fortement associé à *son* comme on l'a vu, d'une part parce que c'est le terme utilisé par le savoir à enseigner, d'autre part le terme bruit, d'usage plus courant, est très connoté négativement. L'entrée *bruit* du dictionnaire des synonymes Larousse³⁹ permet en effet de mesurer l'aspect gênant, discordant et désagréable du bruit.

Il s'agissait alors de repérer les traits sémantiques associés au terme son en demandant aux élèves de juger de la véracité de certains usages attribuant telle ou telle propriété au son⁴⁰.

Il nous a paru également intéressant d'étudier des termes correspondant à des concepts dans le savoir à enseigner. Nous avons alors choisi des termes essentiels à ce savoir mais possédant également une polysémie forte. Les termes choisis devaient être connus des élèves (donc être d'un usage *a priori* courant). L'appartenance à d'autres domaines scientifiques a renforcé l'intérêt porté à certains de ces termes. Les mots appartenant à ces catégories sont : *intensité*, *vibration* (et verbe associé), *fréquence*, *propagation* (et verbe pronominal dérivé).

La confusion constatée très tôt dans l'usage des termes *aigu* et *grave* nous a amené à les étudier également. Même si les autres sens auxquels ils donnent lieu sont très éloignés du domaine sonore, il est a priori possible d'envisager des interférences avec l'usage sonore. De même le concept de volume, très polysémique, bien plus utilisé dans le domaine sonore quotidien que ne le fait la physique, nous a paru intéressant.

Les verbes émettre et recevoir ont des contextes d'usage très variés et ont une importance toute particulière pour le savoir à enseigner, et en particulier dès l'instant où la chaîne sonore est utilisée.

Enfin, le terme *résonner* a été choisi parce qu'il semble avoir une importance dans l'usage courant relatif au son, que ne lui accorde pas le savoir à enseigner (cf. en

³⁹ Les synonymes cités sont les suivants : battement, bourdonnement, frémissement, froufrou, fracas, retentissement, ronron, rumeur, vacarme, cri, criard, bousin, boucan, brouhaha, bruissement, cacophonie, chahut, chambard, charivari, clabauderie, clameur, hurlement, murmure, plainte, tapage, tintamarre, tumulte ("Nouveau dictionnaire des synonymes", Larousse, Paris, 1977).

⁴⁰ Nous n'étudierons pas les formes lexicales dans lesquelles le son peut être impliqué et le sens qui peut être attribué à une même tournure. Ceci nécessiterait cependant une étude spécifique. Par exemple l'expression "le son monte" peut recouvrir trois significations distinctes : la hauteur augmente, le niveau sonore augmente, le son monte spatialement (dans un immeuble par exemple).

particulier les travaux de Mazens au chapitre III).

Nous avons bien conscience du caractère quelque peu subjectif du choix de ces termes, inhérent à la conception d'un questionnaire qui ne devait pas être trop long. D'autres termes auraient répondu à ces critères (nous pensons par exemple à *amplitude*, *hauteur*, *onde* en particulier).

Cependant, il est remarquable de constater (diagramme IX.2-2.) que, si l'on excepte *onde*, *amplitude*, et les termes désignants des objets, les termes choisis *a priori* sont ceux dont on constate une évolution forte de l'association après enseignement (seuls *aigu*, *grave* et *volume* dérogent à la règle).

Ceci apparaît donc comme une confirmation *a posteriori* de la pertinence de nos choix.

IX.3.2 Élaboration du questionnaire

Une fois les items lexicaux choisis, il restait à élaborer le questionnaire passé avant enseignement. Le questionnaire est fourni en annexe dans son intégralité.

Là encore, comme pour le questionnaire sur les systèmes explicatifs, des passations préliminaires (suivies éventuellement de très courts entretiens) ont été effectuées à différents niveaux d'étude pour s'assurer de la compréhension des termes proposés et des questions posées.

Le type de questions posées est largement inspiré de la méthodologie mise au point par Collet (1996). Elle consiste essentiellement en une analyse sémique et la polysémie sera le plus souvent explicitée. Les enquêtes doivent pouvoir donner des indications sur les usages langagiers reconnus comme adaptés. Nous pouvons également espérer repérer les sèmes inhérents (propres au système fonctionnel de la langue) et les sèmes afférents les plus courants (relevant d'autres types de codifications, des normes sociales en particulier) (Rastier cité par Collet, 1996) : nous verrons un exemple avec le terme *volume*. Enfin, nous espérons pouvoir estimer le degré d'acceptabilité des sèmes évoqués par la physique.

La structure générale (reprise de Collet, 1996), pour chaque item, est la suivante :

é vocation de contextes et spécificité d'usage (sauf pour *son*) Plusieurs phrases décrivant des situations ordinaires (parfois scientifiques) sont proposées. Nous jouons ici au maximum sur la polysémie du terme. La polysémie et les différents contextes ont été en partie repérés grâce aux définitions données par le dictionnaire (ces définitions sont fournies en annexes). Le questionnaire étant passé hors de la classe de physique, les termes ne sont *a priori* pas reconnus comme des termes du savoir de la physique scolaire. Au lieu de demander la production d'une phrase comme le fait Collet (1996), nous demandons ici de désigner la phrase dans laquelle le terme est difficile à remplacer ou dans laquelle l'emploi du mot est le plus courant (pour *fréquence*, *aigu* et *grave*). Ceci permet de repérer ce qui semble être le contexte d'usage le plus adapté au terme, lui donnant la signification la plus spécifique.

Production d'une définition (sauf pour volume, aigu/grave et son) Cet exercice extrêmement difficile pour les élèves oblige à sélectionner ce qui paraît être les traits sémantiques saillants du terme.

La recherche de sèmes Cette recherche est faite à l'aide de la proposition d'usages dont on demande de noter de degré de vérité (de 0 à 10). Pour les items conceptuels (intensité, vibration, fréquence, propagation), on demande si la propriété proposée représente bien ou mal le concept en question.

Mentionnons encore la recherche de caractéristiques sémantiques par association iconique, proche de ce que Collet (1996) appelle la recherche des topologies. Ceci sera proposé dans le cas des verbes ou descripteurs perceptifs pour lesquels la métaphore peut jouer un rôle important. Il peut être demandé soit d'attribuer un schéma très simplifié (parmi une liste) à un événement donné (pour *émettre* et *recevoir*), soit de décrire par un schéma l'action impliquée dans une phrase donnée (*propagation*).

Signalons enfin que pour le couple *aigu/grave*, il est demandé des couples d'adjectifs correspondants (pour observer le type de polarité en jeu) et de décrire par une flèche (dont l'orientation et l'épaisseur peuvent varier) le passage d'un son grave à un son aigu. Ceci peut permettre d'estimer de degré de compatibilité de ce type de description issue éventuellement d'associations métaphoriques avec les représentations conventionnelles utilisées en physique (spectre, relation aigu/grave-hauteur) ou en musique (portée).

L'ordre de présentation des items (et donc, selon les consignes données aux élèves, l'ordre de réponse) est le suivant :

Volume, intensité, fréquence, vibrer/vibration, émettre, recevoir, se propager/propagation, résonner, son. Cet ordre permet de retarder au maximum le repérage du contexte scientifique d'une part, sonore de l'autre.

IX.3.3 Conditions de passations

IX.3.3.1 Population

Le questionnaire a été passé par 263 élèves de 9 classes différentes de 2^{nde} de la région lyonnaise. Cinq de ces neuf classes ont également passé le questionnaire du chapitre VII. Dans ce cas, le présent questionnaire a été passé (sauf pour une classe pour laquelle ça n'a pas été possible) en premier, pour éviter une mise en contexte fortement orientée vers la physique.

IX.3.3.2 Contexte de passage

Comme le mentionne Collet (1996), **"la description [sémantique] recherchée, si elle veut tenir compte de l'influence de la langue courante, doit être obtenue en dehors du contexte spécifique de la classe de physique"** (p.145). Les questionnaires ont été systématiquement passés en cours de français. Pour la même raison, pour les classes

ayant passé nos deux questionnaires, le présent questionnaire a été passé en premier. Même si cela n'a pas été exploité, le système de repérage des élèves (tout en garantissant l'anonymat) permet de croiser les réponses de tout élève ayant passé les deux questionnaires.

La durée de réponses est de l'ordre de l'heure, voire un peu plus pour les plus lents. Ceci explique que les derniers items recueillent moins de réponses que les premiers (certains n'ont pas eu le temps de finir).

La passation était anonyme et présentée de façon similaire à ce que nous avons exposé pour le questionnaire du chapitre VII :

- voir le questionnaire comme une enquête (ou sondage) sur certains mots ;
- ne pas chercher les "bonnes" réponses, il n'y en a pas ; ce qui compte est l'opinion ;
- ne passer au mot suivant que lorsqu'on a fini de répondre.

Le questionnaire a été passé juste avant le début de la partie du cours sur les sons. Il faut se souvenir que dans la grande majorité des cas, les élèves viennent de traiter, pendant environ trois mois, des problèmes d'électricité. Ceci peut avoir une importance capitale pour certains termes, en particulier *intensité*. Seules trois classes sur les neuf ont traité de l'électricité puis de l'optique avant d'aborder la partie sur les sons. Les autres n'ont traité que d'électricité au moment de passer le questionnaire.

IX.4 Résultats et analyse

Le type de réponses à fournir a permis un dépouillement optique, ce qui explique l'aspect particulier des questionnaires. Par contre, les réponses à fournir en langage naturel (définitions, synonymes) ou par représentation iconique n'ont pas pu être traitées de cette façon. Nous n'aborderons pas les résultats concernant ces questions.

Les questions qui consistent à cocher une case ont évidemment tendance à favoriser les réponses au hasard. Pour limiter cet effet, nous n'avons pas inclus aux données les réponses pour lesquelles il était possible de repérer un motif graphique dans les cases cochées (par exemple de 10 à 0 en parcourant les items).

Nous avons effectué des tris "à plat" des réponses qui sont suffisants pour dégager des tendances.

Pour des raisons techniques les items *propagation/se propager* et *aigu/grave* n'ont pas pu être dépouillés.

Les résultats sont présentés dans l'ordre de présentation des items dans le questionnaire (et donc dans l'ordre de réponse des élèves).

IX.4.1 Volume

IX.4.1.1 Spécificité d'usage et polysémie

Les phrases de l'évocation de contextes sont les suivantes :

1. Les caisses de livres occupent un tel volume dans mon bureau que je n'ai plus la place de bouger 2. **Sa voix manque de volume pour qu'il puisse parler en public.** 3. **Cette encyclopédie comporte vingt volumes.** 4. **Pendant ce concert le volume sonore était tellement fort que j'en ai encore les oreilles qui sifflent.** 5. **Le volume d'un cube est obtenu en calculant le cube de la longueur de son côté.**

Les résultats sont regroupés dans le diagramme IX-5.

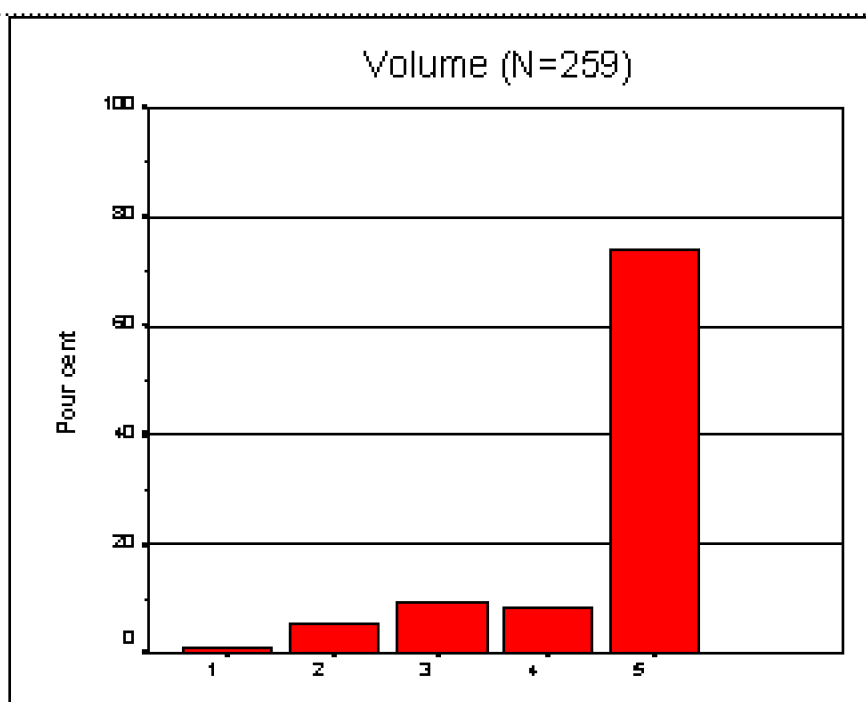


diagramme IX-4-1 : spécificité d'usage de volume

Nous constatons ici la prégnance du contexte mathématique. L'influence du milieu scolaire est certaine mais ces réponses révèlent que la précision et la spécificité de la notion sont surtout effectives pour le volume géométrique *calculable*. Le volume sonore n'est pas reconnu comme spécifique. Les usages dérivés ou métaphoriques sont également délaissés. Ceci est finalement en relatif accord avec le discours de la physique qui ne fait pas du volume, dans le contexte sonore, un concept pertinent.

Ces résultats ne veulent pas dire, cependant, que l'usage sonore ne soit pas reconnu comme adapté dans certaines situations, comme nous allons le voir.

IX.4.1.2 Recherche des sèmes

Les résultats obtenus lorsqu'on demande aux élèves de noter les usages du mot volume sont regroupés dans le tableau IX.4-1. Nous avons mentionné (nous le ferons à chaque fois) la moyenne des notes attribuées (sur 10), l'écart-type pour donner une idée de la dispersion et le nombre de réponses obtenues pour chaque item de la question.

Tableau IX.4-1 : recherche de sèmes pour *volume*

	Propriété	Moyenne	Écart-type	N
1	'Tout objet a un volume plus ou moins grand'	7.0	2.9	258
2	'Tout son a un volume plus ou moins grand'	4.5	3.4	259
3	'Tout son a un volume plus ou moins grave'	4.1	3.6	255
4	'Tout volume d'un son peut se mesurer'	5.6	3.3	253
5	'Tout son a un volume plus ou moins fort'	7.0	3.0	253
6	'On peut régler le volume du son émis par la télévision'	8.6	2.4	256
7	'Tout volume d'un objet peut se mesurer'	7.0	3.2	258
8	'Le volume d'une voix donnée peut changer'	4.1	3.3	258
9	'Un son de grand volume prend de la place'	1.2	2.0	259
10	'On peut régler le volume de la télévision'	6.6	4.0	254
11	'Le volume d'un son c'est l'intensité sonore'	7.0	3.1	250
12	'Le volume est indépendant de l'instrument de musique qu'on utilise'	3.5	3.3	245

Notons d'abord que les interférences entre contexte spatial (privilégié) et contexte sonore semblent faibles.

Nous constatons la confirmation de l'importance du sème spatial (items 1 et 12 relativement bien notés). Nous aurions cependant pu nous attendre à un résultat encore supérieur pour le premier item relativement peu restrictif.

La confusion volontairement métaphorique de l'item 9 entre volume spatial et volume sonore est rejetée. Les élèves expriment ainsi la conscience qu'ils ont de la polysémie et des contextes d'usage variés qu'il n'est pas possible de confondre.

Les caractères quantifiable et mesurable sont bien mieux acceptés dans le cas spatial que dans le cas sonore (items 1 et 7 à comparer aux items 2 et 4). Si le volume du son n'est pas jugé comme pouvant être grand (item 2), il peut par contre être fort (item 5). Nous avons donc ici un effet lexical fort de l'adjectif utilisé : ce qui peut être dit d'un son peut l'être du volume du son.

Globalement, les items faisant intervenir un son reçoivent des notes très contrastées.

Les items 6 et 10 doivent être comparés. Si la syntaxe et la rigueur, mais peut-être aussi la familiarité de la situation de "on peut régler le volume de la télévision" permettent une très bonne note, la métonymie de l'item 10 est beaucoup moins bien jugée. L'écart-type laisse penser que les réponses se répartissent selon des points de vue bien différents : il y aurait ceux qui acceptent une telle métonymie (par son aspect courant), et ceux qui perçoivent le décalage avec l'item 6 et sanctionnent alors ce qu'ils estiment être un manque de rigueur. Le volume peut également être pris au sens spatial (l'élève voit là un piège) et la télévision n'ayant évidemment pas un encombrement réglable, la note est très faible.

Enfin, malgré des syntaxes très différentes ces deux items 8 et 12 permettent de conclure que le volume sonore est attaché très fortement à l'émetteur sonore (respectivement voix et instrument) ce qui pourrait être résumé par l'expression "à chaque émetteur son volume". C'est là une différence fondamentale avec ce qui est le correspondant du volume sonore dans le savoir à enseigner, i.e. le niveau acoustique. Cette dépendance forte entre volume et émetteur, si elle est étendue au niveau acoustique et au caractère plus ou moins fort (l'item 11 indique que cette extension semble facile), risque de poser d'importants problèmes pour l'apprentissage.

Pour résumer nous pouvons dire que, hors de tout contexte social précis, c'est plutôt le volume spatial, voir géométrique dont l'usage est pertinent pour les élèves. Dans tous les cas, et malgré des variations, le volume est une entité variable et quantifiable sur laquelle on peut parfois agir (cas sonore).

IX.4.2 Intensité

IX.4.2.1 Spécificité d'usage et polysémie

Les phrases de l'évocation de contextes sont les suivantes :

1.
Il avait une telle intensité dans le regard que je n'ai pas pu le regarder dans les yeux.
- 2.

L'issue du match était tellement incertaine que ce fut d'une grande intensité.

3.

C'est du fait d'une intensité trop forte du courant électrique qu'on peut s'électrocuter.

4.

Il y a eu une averse d'une telle intensité que j'ai été trempé en deux minutes.

5.

Si un son a une intensité trop forte il peut être dangereux pour l'oreille.

Les résultats sont regroupés dans le diagramme IX.4-2.

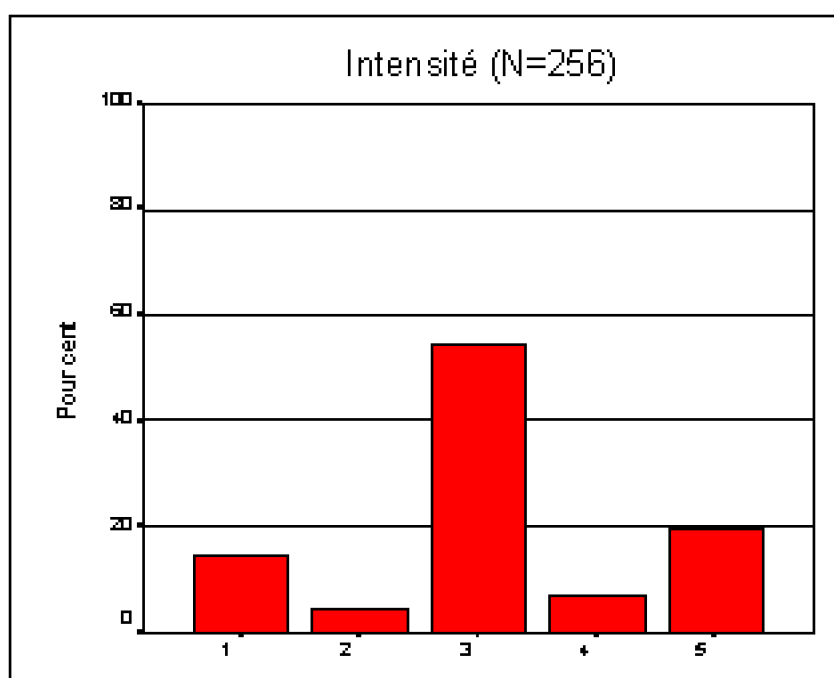


diagramme IX-4-2 : spécificité d'usage d'intensité

Nous voyons là l'importance de l'enseignement qui vient de se terminer au moment de la passation du questionnaire, et ce même si celle-ci a lieu en cours de français. Ce terme dont l'usage courant n'est pas forcément pratiqué par les élèves n'a donc pas eu de mal à devenir un concept scientifique (dans le domaine de l'électricité), dont les questions suivantes vont pouvoir révéler les sèmes. Alors que plus de la moitié des élèves choisissent l'intensité électrique, ils sont à peine 20% à penser que c'est le contexte sonore qui rend le mieux compte du terme. Nous avons pourtant adopté une syntaxe et des adjectifs similaires dans les deux cas pour en limiter les effets. Il y a donc là un renversement de l'origine étymologique sonore du terme intensité (d'après Picoche, 1994).

Les usages plus figurés ne sont pas jugés représentatifs du terme (avec préférence cependant pour l'intensité du regard).

IX.4.2.2 Recherche des sèmes

La recherche de sèmes était ici séparée en deux questions. L'une proposait des phrases usuelles pour lesquelles les élèves devaient dire si la propriété de l'intensité en jeu est représentative. L'autre proposait explicitement des caractéristiques intrinsèques non mises en scène.

Les résultats sont regroupés dans les tableaux IX.4-2 et IX.4-3.

Tableau IX.4-2 : résultats de la question 3 pour *intensité*

		Moyenne	Écart-type	N
1	'Il faut une intensité pour produire un son.'	4.1	3.2	255
2	'L'intensité d'un son diminue lorsque le son se déplace.'	5.1	3.6	254
3	'Une pile délivre une intensité électrique.'	7.4	3.1	259
4	'C'est le volume du son qui détermine l'intensité sonore.'	6.3	3.1	247
5	'On entend d'autant mieux un son que son intensité est grande.'	5.8	3.5	253
6	'Dans un circuit électrique le courant a une intensité.'	9.0	2.1	260
7	'L'intensité d'un son détermine le niveau sonore perçu.'	5.9	3.1	254

L'effet du contexte électrique est là encore bien visible (item 3 et 6) : l'intensité caractérise le courant électrique et peut même être délivrée par une pile (métonymie classique avec courant et intensité). L'intensité peut dans une moindre mesure être attribuée au son : elle en est plus une caractéristique (items 2, 4, 5 et 7 notés entre 5 et 7,5) qu'une cause (item 1). Ce relatif accord avec le point de vue scientifique ne doit pas masquer la faiblesse (par rapport au point de vue scientifique) des notes recueillies par les items qui associent son et niveau sonore perçu (à peine plus de 5 sur 10). Le passage sémantique entre l'*intensité électrique* et l'*intensité sonore*, qui pourrait être assuré par la

notion *intensité*, ne semble donc pas très facile.

Tableau IX.4-3 : résultats de la question 4 pour *intensité*

	Propriété	Moyenne	Écart-type	N
1	'ça donne une idée de grande quantité'	3.5	3.6	257
2	'ça indique si quelque chose est fort'	6.8	3.0	257
3	'ça se mesure'	9.0	1.8	259
4	'ça se règle'	7.1	3.3	259
5	'ça devient dangereux si c'est trop grand'	7.0	3.3	257
6	'ça nécessite de l'énergie'	5.7	3.5	253
7	'ça fournit de l'énergie'	4.6	3.7	253

Les réponses assez contrastées au sujet des caractéristiques intrinsèques permettent de dégager les tendances suivantes :

- la référence à l'électricité semble sous-jacente lorsque aucun contexte n'est proposé : ceci explique probablement les bons scores des items 3 et 4 (les élèves ont souvent mesuré, voire réglé l'intensité) ;

- le rapport causal à l'énergie ne semble pas très bien établi, ni dans un sens ni dans l'autre, il ne semble pas être un trait sémantique fort (item 6 et 7) ; la meilleure note pour l'énergie nécessaire (item 6) est probablement encore une fois due à la référence électrique (pensée courante selon laquelle les centrales électriques ou l'électricité fournissent de l'énergie) ;

- le sème "fort" semble assez attaché à l'intensité (mais n'est cependant pas majeur) alors que l'idée de grande quantité est rejetée ; si la quantité est attribuée à ce qui est matériel, cela indique la nature abstraite attribuée à l'intensité.

Au total il semble difficile pour les élèves de concilier les différents traits sémantiques liés aux emplois divers du terme et de dégager des traits sémantiques unifiants. La compatibilité entre plusieurs contextes risque donc de poser problème dans une stratégie d'enseignement, si les distinctions sémantiques selon le domaine étudié ne sont pas explicitées.

IX.4.3 Fréquence

IX.4.3.1 Spécificité d'usage et polysémie

La polysémie de *fréquence* n'est pas très grande mais le terme recouvre une facette qualitative et une facette quantitative. L'usage qualitatif est plutôt commun, généralement par transformation syntaxique à partir de l'adjectif *fréquent*, dont l'usage semble plus courant. L'usage quantitatif est scientifique : la fréquence désigne alors une grandeur physique, quantifiable, possédant une unité et une définition rigoureuse permettant de caractériser tout phénomène périodique. Cet exemple est typique de la coprésence, pour le scientifique, de la notion et du concept. Dans nombre de domaines scientifiques il est ainsi courant d'évoquer la fréquence d'un phénomène sans évoquer la quantification précise de cette fréquence.

Les phrases de l'évocation de contextes sont les suivantes :

1.
La fréquence de ces phénomènes commence à inquiéter les scientifiques.
 2.
Le "la" du diapason est le son pur dont la fréquence est 440 Hertz.
 3.
Le courant électrique alternatif domestique a une fréquence de 50 Hertz.
 4.
Je vais assez régulièrement chez le coiffeur, avec une fréquence d'un mois environ.
 5.
Mon poste de radio est toujours réglé sur la fréquence de ma station de radio préférée.
- Il était demandé ici de désigner la phrase dans laquelle l'emploi de *fréquence* est "le plus courant". Les résultats sont regroupés dans le diagramme IX.4-3.

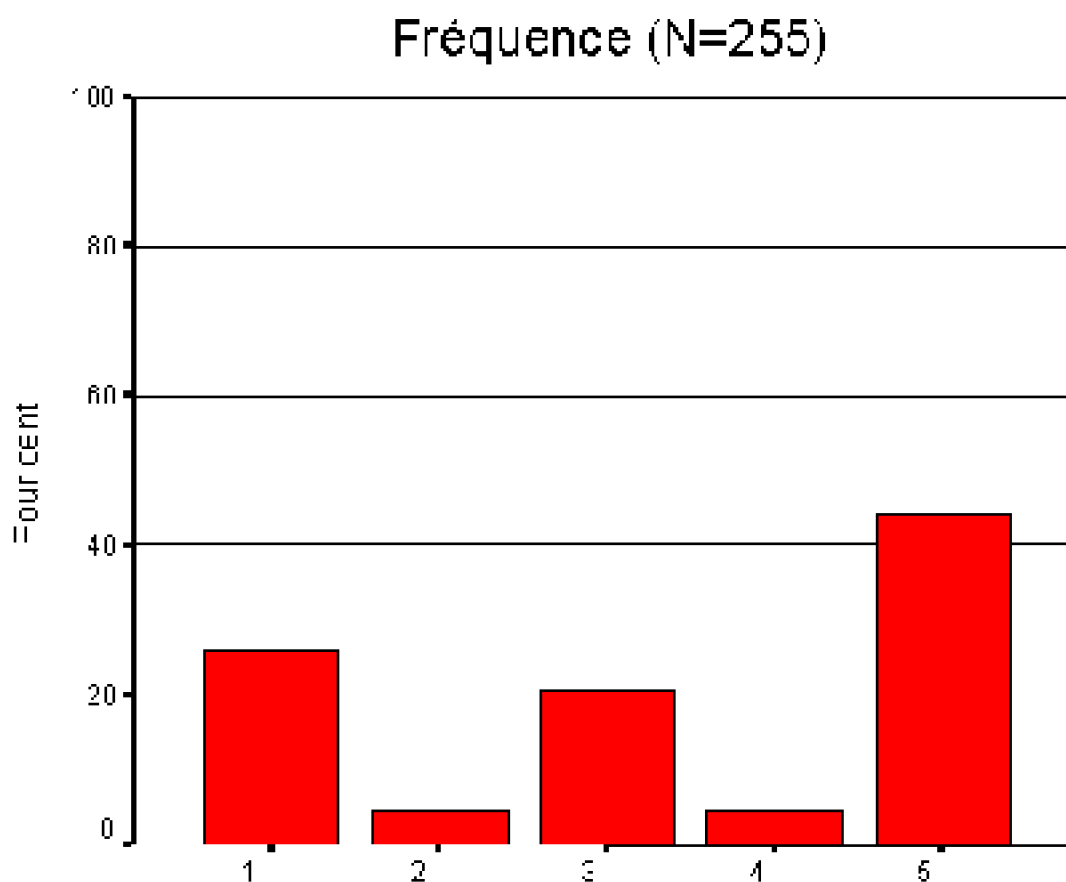


diagramme IX-4-3 : usage le plus courant de fréquence

Il est relativement normal, vue la question posée, de retrouver mentionnés ici les usages plutôt quotidiens, même si ceux-ci (phrase n°5 en particulier) ont une origine technico-scientifique. La fréquence d'une radio est une notion qui est passée dans le langage courant, en s'éloignant du concept scientifique qui en est à l'origine (fréquence porteuse de l'onde électromagnétique par exemple). La phrase n°2, qui est la seule à évoquer le domaine sonore, n'est que très peu choisie. Nous retrouvons par contre la prégnance du domaine électrique, seul contexte scientifique choisi de façon significative. La tentative d'un usage quotidien proche de l'usage scientifique (phrase n°4 où la fréquence, en l'occurrence plutôt la période, est quantifiée) est finalement rejetée.

Ces résultats montrent que si la notion est connue et utilisée, elle l'est en référence à des entités bien précises (radio ou courant électrique). L'enseignement devra donc tout particulièrement veiller à redéfinir précisément cette notion, en explicitant le rapport à la notion courante, et en la particularisant enfin dans le cas de la vibration sonore.

IX.4.3.2 Recherche de sèmes

Les propriétés intrinsèques ont été évaluées de la façon suivante (tableau IX.4-4) :

Tableau IX.4-4 : résultats de la question 4 pour *fréquence*

	Propriété	Moyenne	Écart-type	N
1	'ça se règle'	7.0	3.1	264
2	'c'est grand'	2.5	2.8	264
3	'c'est théorique'	3.3	2.9	249
4	'ça va vite'	3.2	3.1	256
5	'c'est un nombre qu'on peut mesurer'	7.5	3.1	263
6	'ça indique si un événement est fréquent'	6.8	3.5	262
7	'ça mesure le nombre d'événements par seconde'	5.2	3.9	260
8	'c'est abstrait'	4.1	3.6	252
9	'ça n'existe que pour quelque chose de périodique'	6.1	3.6	257
10	'ça donne une idée de la vitesse d'un phénomène'	6.1	3.4	260

La fréquence apparaît d'abord comme une entité quantifiable qu'il est donc possible de mesurer (item 5) mais aussi de régler (item 1). Ces traits sémantiques ne poseront aucun problème dans le cas de l'enseignement du son. Cette grandeur ne semble pas posséder de traits intrinsèques. En tous les cas, ni l'idée de vitesse ni l'idée de grandeur n'y sont associées (items 2 et 4).

Paradoxalement, l'item 3 indique que la fréquence est davantage vue comme quelque chose de pratique que comme une entité théorique ; le fait que ce soit mesurable et réglable peut fournir une interprétation de ce type de point de vue. L'item 8 (*c'est abstrait*) ne fait que confirmer cette tendance.

La proximité lexicale avec *fréquence* fait que l'item 6 est évidemment plutôt bien noté mais il est surprenant que la note ne soit pas supérieure, puisqu'il s'agit juste ici de confirmer le lien sémantique entre l'adjectif et le substantif. Ceci rend probablement compte de l'écart entre l'usage notionnel courant plutôt attaché à l'adjectif et l'usage conceptuel supporté par le substantif.

Les traits scientifiques ne sont pas très bien notés (items 9 et 10) même si des connaissances semblent déjà en place sur ce que peut indiquer le concept scientifique de fréquence. Finalement ce qui est essentiel pour la signification scientifique n'apparaît pas comme saillant pour les élèves : l'item n° 7 (*ça mesure le nombre d'événement par seconde*) en est une confirmation supplémentaire puisque cette propriété, la plus proche de la définition scientifique, n'obtient que la moyenne (avec une forte dispersion). L'appui

sur la notion pour définir le concept devra donc constituer une étape importante parce que non évidente.

IX.4.4 Vibrer, vibration

Nous avons eu l'occasion, à maintes reprises, de souligner l'importance du terme de *vibration* (et par suite du verbe *vibrer*) aussi bien dans l'usage courant au sujet du son (utilisé en tant que notion) que dans le discours scientifique sur le même sujet (utilisé en tant que concept).

Nous avons également signalé la relative compatibilité qui semble émerger entre la notion et le concept. Les résultats ci-dessous sont l'occasion d'approfondir ce point.

IX.4.4.1 Spécificité d'usage et polysémie

Même si les structures syntaxiques envisageables avec *vibrer* ne sont pas d'une grande diversité (le verbe semble monovalent, puisque les constructions sont du type *une entité vibre*), l'utilisation d'adverbes, la variation des actants et les usages figurés permettent de repérer les usages spécifiques (et les traits sémantiques).

Les phrases de l'évocation de contextes sont les suivantes :

1. Pour qu'on puisse entendre une guitare il faut qu'une de ses cordes vibre. 1.
2. Je vibre à l'idée d'aller à cette réception . 2.
3. Cette maison est tellement vieille que le sol vibre lorsqu'on marche dessus. 3.
4. Pour évaluer la rapidité avec laquelle un objet vibre, on mesure sa fréquence de vibration. 4.

Les résultats sont regroupés dans le diagramme IX.4-4.

Vibrer, vibration (N=255)

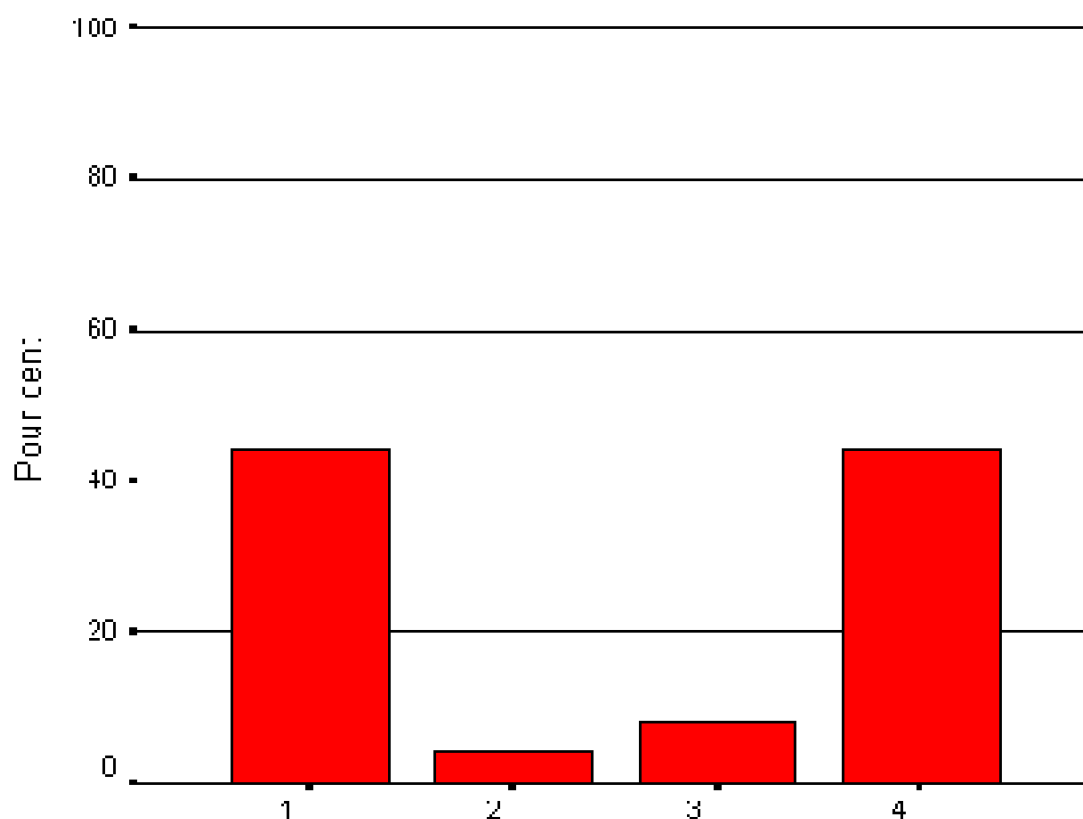


diagramme IX.4-4 : spécificité d'usage de vibrer

L'usage figuré, mettant en scène un actant humain (phrase n°2), ne semble pas caractéristique.

Par contre le verbe est perçu très adapté pour décrire le mouvement de la corde de guitare (phrase n°1). Nous avons déjà vu que la vibration de la corde de guitare est assez facilement évoquée avant enseignement pour invoquer la cause de création du son de la guitare (cf. résultat à la question I, § VIII.1.7). Le mouvement de la corde est même décrit ainsi par des enfants très jeunes (voir en particulier Mazens (1999)). Les raisons tiennent essentiellement au fait que c'est généralement une situation qui a été observée, et pour laquelle la vibration de la corde est en partie visible et en tous les cas perceptible par le toucher. Par contre, un autre objet matériel tel que le sol (phrase n°3) ne semble pas avoir les caractéristiques requises pour pouvoir vibrer, ou bien est-ce le mouvement du sol qui n'a pas les caractéristiques requises. Soit l'objet est jugé trop grand ou massif, soit le mouvement est trop lent ou pas assez perceptible. Ceci peut évidemment avoir des conséquences importantes sur la perception *a priori* des objets capables d'émettre un son (les objets trop massifs, même frappés, ne pourraient pas vibrer) ou des mécanismes d'émission sonore ("un objet massif frappé émet un son mais il ne peut pas vibrer", il pourrait donc y avoir son sans vibration).

Enfin, l'usage scientifique (phrase n°4), dans lequel le terme est associé à *fréquence*, est jugé spécifique par plus de 44% des élèves (autant que pour la phrase n°1). Il est

possible que l'effet de proximité chronologique des questions sur *fréquence* (mot précédent dans le questionnaire) joue ici un rôle important qui tend à augmenter ce pourcentage.

Il semble finalement que les avis soient ici partagés entre une spécificité qui relève plutôt de la notion (guitare) et une autre qui relève du concept (fréquence de la vibration).

IX.4.4.2 Recherche de sèmes

Les propriétés intrinsèques proposées pour vibration sont mentionnées dans le tableau de résultats IX.4-5.

Tableau IX.4-5 : résultats de la question 4 pour *vibration*

	Propriété	Moyenne	Écart-type	N
1	'c'est un mouvement de va-et-vient'	7.1	3.2	260
2	'ça se voit à peine tellement c'est rapide'	6.1	3.2	261
3	'ça se voit à peine tellement c'est petit'	2.9	3.1	259
4	'ça se mesure'	5.7	3.6	258
5	'ça se déclenche tout seul'	2.4	2.9	255
6	'ça a une amplitude '	6.1	3.3	242
7	'ça fait bouger quelque chose de concret'	6.7	3.1	259
8	'ça s'entend'	7.0	3.0	258
9	'ça peut être lent.'	4.3	3.5	256
10	'ça se déplace facilement'	4.3	3.2	249
11	'ça se transfert facilement'	3.7	3.2	242
12	'ça peut se sentir si on touche'	8.2	2.8	258

A la lecture de ce tableau nous pouvons identifier, de façon schématique, les sèmes suivants :

le va-et-vient ou mouvement d'aller-retour (item 1) ; nous voyons là le trait principal de

la notion, compatible avec ce que la physique dit du même signifiant ;

une association assez forte avec le son (item 8) ; nous avons déjà rencontré cette relation assez forte dans d'autres questions du chapitre précédent ;

une capacité à être perceptible par le toucher (item 12) ; nous avons là une confirmation de l'intérêt qu'il peut y avoir à utiliser ce type de perception dans l'enseignement pour mettre en évidence les vibrations des émetteurs sonores ;

il y a toujours une cause (item 5).

Les propriétés inhérentes à la vibration ne sont pas très bien notées : la vibration n'est pas par essence petite (item 3) ni lente (item 9), et elle est plus facilement rapide (item 2, pour lequel, cependant, on ne sait pas si c'est la rapidité ou la visibilité qui est notée). Là encore, ce dernier point est plutôt cohérent avec les situations de créations sonores mais pas forcément avec la vibration physique plus générale, que rien n'interdit d'avoir une faible fréquence.

Le fait que l'amplitude caractérise la vibration est une connaissance qui reste largement à construire, même si le terrain est plutôt favorable puisque la propriété n'est pas rejetée (item 6).

Enfin, un point très important qui pose problème à l'enseignement de la physique du son : la vibration ne se transfère pas vraiment (items 10 et 11) et reste finalement très localisée. Rien d'étonnant alors qu'il ne soit pas facile d'admettre, comme on le voit dans certains ouvrages de vulgarisation ou même scolaires, que la vibration est transmise au milieu. Cela justifie, à notre sens, la nécessité d'un mécanisme explicatif de type particulière pour la propagation du son.

IX.4.5 Émettre

Les deux termes (*émettre* et *recevoir*) dont nous allons maintenant traiter doivent être mis en regard par la symétrie qu'ils entretiennent mutuellement. Leur usage n'est cependant pas similaire. La multiplicité des contextes d'usage semble bien plus grande pour *recevoir* (voir par exemple les définitions du Robert fournies en annexes). Le verbe émettre voit un grand nombre de ces usages, même courants, concerner des domaines techniques ou scientifiques. Il semble qu'il soit souvent à ce titre un bon exemple de notion utilisée presque telle quelle dans le domaine scientifique. En effet, si ces deux verbes sont utilisés dans le domaine scientifique, cela se fait généralement sans aucune redéfinition. C'est la notion qui est exploitée.

Ces deux verbes donnent lieu à des usages figurés ou métaphoriques. Dans l'évocation de contextes, nous avons varié les contextes d'usage bien plus que le sens. Les deux termes n'ont pas, en effet, une polysémie très forte.

IX.4.5.1 Spécificité d'usage et polysémie

Les phrases de l'évocation de contextes sont les suivantes :

1.
Quand on émet un avis, il est préférable de bien connaître le sujet.
2.
Il a émis le souhait de ne plus faire partie de ce groupe.
3.
Les banques sont bien peu compréhensives envers les gens qui émettent des chèques en blanc.
4.
Au moment du naufrage, le Titanic a émis un signal de détresse.
5.
Les stations de radio nationales émettent sur tout le territoire français.

Les résultats sont les suivants (diagramme IX.4-5) :

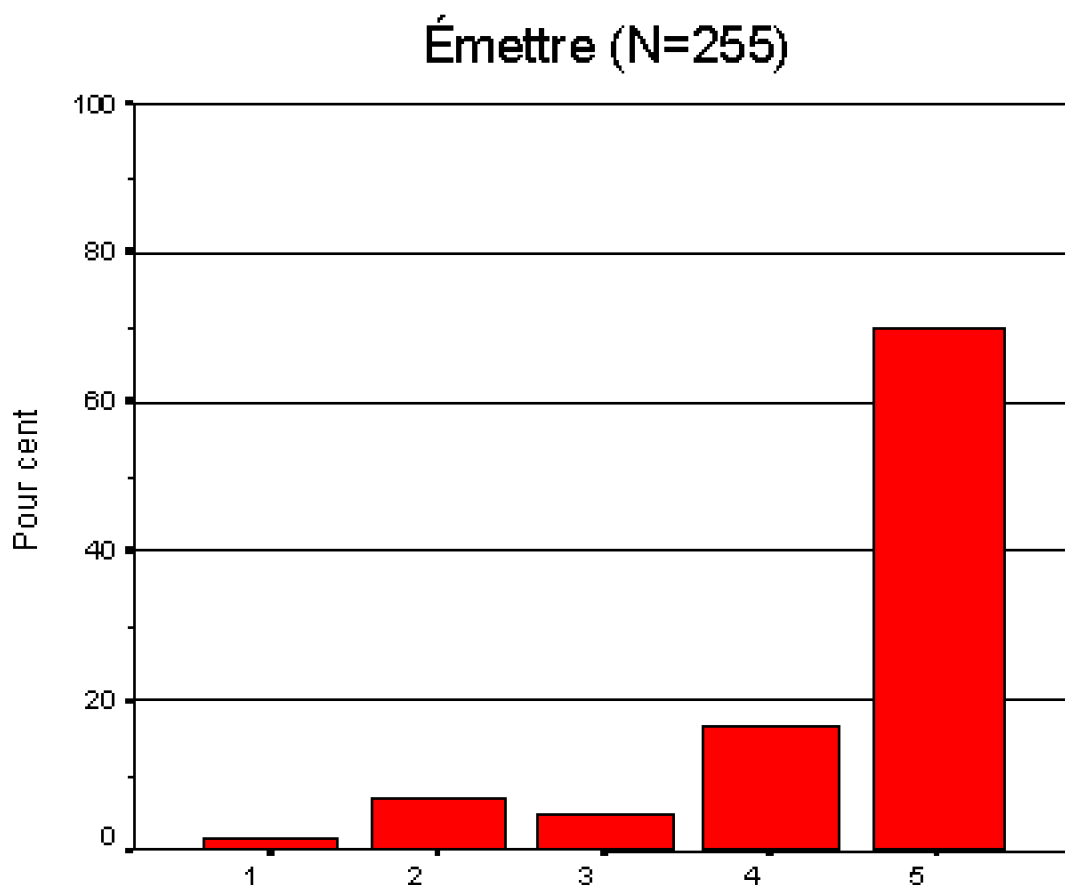


diagramme IX.4-5 : spécificité d'usage de émettre

Nous constatons que c'est l'émission d'un signal, en particulier dans le cas radiophonique (70% des réponses), qui est largement perçu comme spécifique du terme. Nous pouvons y voir l'influence forte du contexte social qui a permis (comme pour fréquence) le passage dans le langage courant à partir d'un phénomène devenu familier

(l'émission radiophonique). Les moyens de télécommunications modernes (téléphonie sans fil en particulier) ne font que renforcer ce type d'usage. Cela ne veut pas dire que l'usage privilégié est scientifique. C'est un usage courant issu du domaine technico-scientifique. La sphère scientifique ne reconnaît pas ces usages comme scientifiques (mais parlera plutôt d'émission UV, d'émission spontanée, en ayant davantage recours au substantif mais surtout en précisant toujours l'entité émise). Les usages plus figurés ou concernant des émotions ou sentiments sont délaissés. De même le sème "mettre en circulation" (cité par le Robert mis en contexte dans la phrase n°3) n'est quasiment pas choisi (il peut d'ailleurs ne pas être connu par les élèves).

Cette spécificité plutôt issue du domaine technico-scientifique est plutôt un atout pour l'enseignement de la physique du son : il semble en effet que les élèves considèrent sans difficulté que les sons puissent également être des entités émises.

IX.4.5.2 Recherche de sèmes

Les propositions, qui s'apparentent davantage à des probables expressions synonymiques qu'à des propriétés, sont les suivantes (tableau IX.4-6) :

Tableau IX.4-6 : résultats de la question 3 pour *émettre*

	Propriété	Moyenne	Écart-type	N
1	'c'est donner quelque chose'	4.5	3.4	260
2	'c'est envoyer quelque chose destiné à être reçu'	5.4	3.4	258
3	'ça nécessite de l'énergie'	3.8	3.2	258
4	'ça projette très loin'	8.3	2.7	260
5	'c'est envoyer quelque chose de concret'	5.1	3.4	261
6	'c'est envoyer quelque chose d'abstrait'	5.2	3.4	261

Nous voyons que le sème "très loin" (item 4) est largement prédominant, alors qu'il n'est pas présent dans les définitions du dictionnaire. Nous interprétons ceci comme une conséquence de ce qui a été mis en évidence dans le paragraphe précédent. La plupart des situations d'émissions électromagnétiques se font maintenant sur des distances très grandes (entre émetteur initial et récepteur final, les relais étant "transparents"). C'est donc là une caractéristique afférente qui émerge, liée à l'environnement social.

L'entité émise peut être aussi bien concrète qu'abstraite (items 5 et 6). La distinction

avec donner (qui possède plutôt le sème de contact ou de proximité) est bien faite (item 1). Enfin, il est accordé une relative importance au récepteur et à la finalité de l'action d'émettre (item 2). Ceci pourra d'ailleurs entrer quelque peu en conflit avec l'idée d'un son rayonnant, si elle était majeure pour le savoir à enseigner, ce qui ne semble pas être le cas au vu des résultats des chapitres précédents. Au contraire la physique scolaire privilégie les situations où il y a un récepteur.

IX.4.5.3 Recherche iconique

Les quatrième questions concernant les verbes *émettre* et *recevoir* demandent d'attribuer un seul schéma à chaque phrase proposée (il a été précisé que certains schémas peuvent ne jamais être choisis et que d'autres peuvent être choisis plusieurs fois). La liste des schémas proposés a été établie de la façon suivante : nous avons proposé une première liste à des élèves de seconde et à des étudiants de DEUG de sciences, en leur demandant de produire des schémas si aucun ne leur semblait adapté. Ceci a permis d'enrichir la liste finalement proposée.

Il n'est pas question ici de se livrer à une analyse fine de ce type de question qui relève en partie de la sémiotique. Nous ne donnons que les grandes tendances qu'il est possible d'en tirer au sujet des caractéristiques sémantiques des usages proposés.

Les schémas proposés pour les six phrases utilisant *émettre* sont les suivants (figure IX.4-1) :

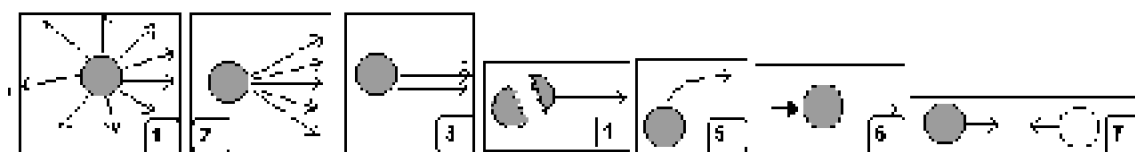


figure IX.4-1 : schémas proposés pour l'association avec différents usages d'émettre

Tous les résultats obtenus à cette question sont regroupés en annexe.

Nous n'exposons ici que les résultats significatifs qu'il nous semble intéressant de signaler :

L'onde et la lumière sont émises dans toutes les directions. Il est remarquable que le schéma 1 soit choisi par 59% des élèves pour décrire quelque chose qui émet des ondes (phrase n°1) et par 64% dans le cas de la lumière (phrase n°3). Les profils de réponses sont comparables pour ces deux phrases. En particulier le schéma 2 (émission rayonnante mais dans une direction privilégiée) est choisi par environ un cinquième des élèves (20% et 16% respectivement).

Un son est émis de façon bien plus directive. Le pourcentage du schéma 1 chute lorsqu'il s'agit de rendre compte de quelque chose mais surtout de quelqu'un qui émet un son (respectivement 16% et 5%). C'est le rayonnement dans une direction privilégiée (schéma 2) mais également l'émission en ligne droite (schéma 3) qui sont plutôt adoptés. Il est également remarquable de constater le relativement fort pourcentage du

schéma 4 dans ces cas, alors qu'il était quasiment inexistant pour l'onde et la lumière. Ceci laisse penser que près d'un quart des élèves (27% pour quelque chose qui émet, 17 % pour quelqu'un) ont une vision quelque peu matérielle ou au moins quantitative du son : émettre un son c'est perdre quelque chose. Lorsque la source est humaine, les schémas 5 et 6 (idée de déclenchement pour ce dernier) sont davantage cités (17% chacun).

Des traits généraux La phrase n° 6 (*quelqu'un émet*) permet de confirmer le sème caractéristique déjà repéré : émettre c'est projeter loin. Le schéma 5, le plus choisi pour cette phrase (30%), est révélateur de ce point de vue (la trajectoire courbée indique la projection d'un "objet" qui va *a priori* le plus loin possible). Dans ce cas, les élèves considèrent également que l'émission est provoquée (un cinquième des élèves choisissent le schéma 6). Nous pouvons enfin noter qu'*émettre un avis* nécessite un interlocuteur ou au moins un destinataire sensé réagir, ce qui est représenté sur le schéma 7 (choisi par 45% des élèves).

Cette méthode semble donc utile pour relever les traits sémantiques caractéristiques de certains usages. L'émission d'un son est vue de façon bien différente de celle de la lumière ou d'une onde. L'expérience quotidienne joue évidemment un rôle déterminant : par exemple toutes les émissions sonores quotidiennes se font dans une direction privilégiée. C'est là encore une différence fondamentale avec la modélisation de la physique qui affirme que le son se propage *a priori* dans toutes les directions (même si, nous l'avons vu, les expériences et situations proposées en classe privilégient la propagation unidirectionnelle).

IX.4.6 Recevoir

IX.4.6.1 Spécificité d'usage et polysémie

Les phrases de l'évocation de contextes sont les suivantes :

1.
Il a reçu une lettre d'un ami qu'il n'avait pas vu depuis dix ans.
2.
Le Commandant recevra cet après-midi la Légion d'Honneur des mains du Président.
3.
Dans leur maison de campagne, nos amis nous ont reçus impeccablement.
4.
J'ai reçu un signal sonore qui m'a prévenu du danger.
5.
Cette année il espère être reçu au concours.

Les résultats, variés, sont décrits grâce au diagramme IX.4-6.

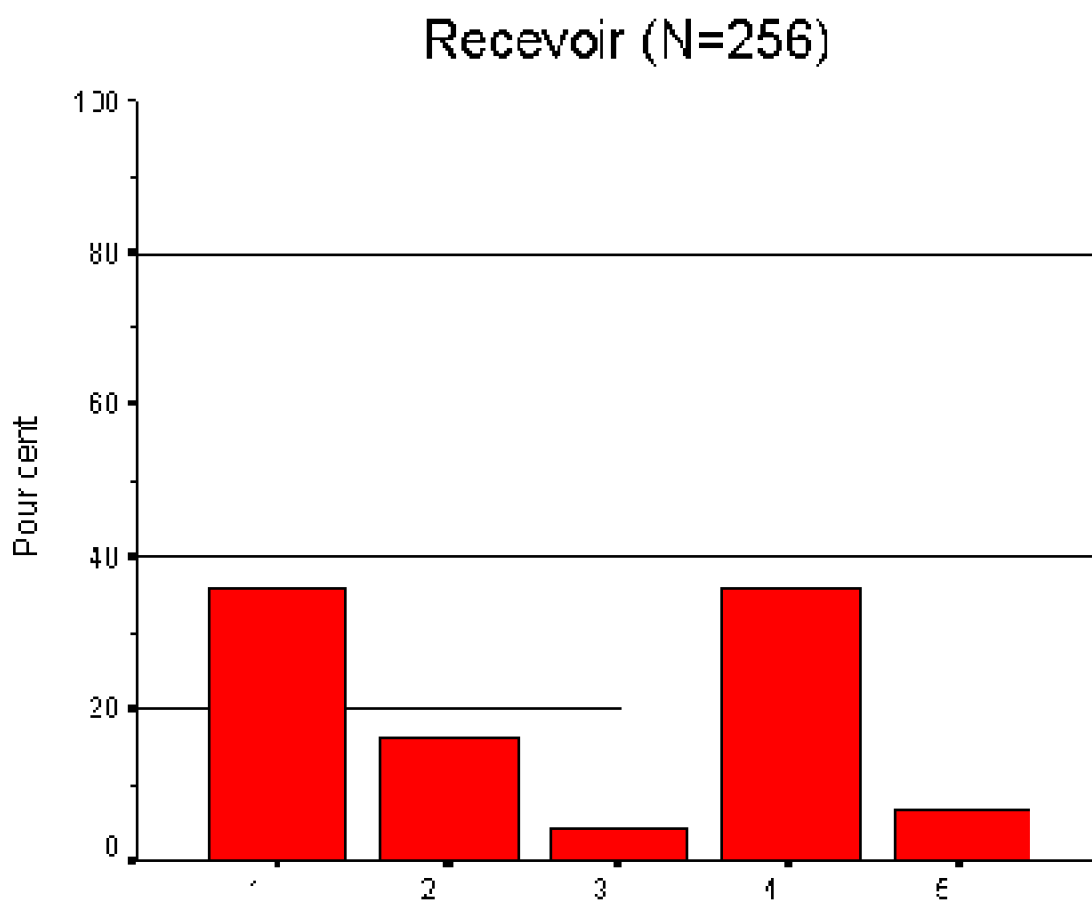


diagramme IX.4-6 : spécificité d'usage de recevoir

Le pourcentage de la phrase n°1 (36% des élèves) indique que l'usage spécifique peut être quotidien, bien davantage que pour *émettre* (en ajoutant le pourcentage obtenu par la phrase n°2, nous obtenons 54% des élèves qui choisissent une situation où l'entité reçue est matérielle). La réception d'un signal sonore recueille aussi 36% des réponses. Nous voyons donc que le terrain est *a priori* favorable pour parler de réception du son dans l'enseignement. La réception de personnes ou à un concours (qui utilise dans les deux cas le sens actif du dictionnaire, *laisser entrer* ou *donner accès*) ne semble pas spécifique du verbe pour les élèves.

IX.4.6.2 Recherche de sèmes

Les propriétés proposées et les résultats obtenus sont les suivants (tableau IX.4-7) :

Tableau IX.4-7 : résultats de la question 3 pour *recevoir*

	Propriété	Moyenne	Écart-type	N
1	'c'est un acte volontaire'	3.2	3.3	261
2	'c'est un événement qu'on subit'	6.9	3.1	261
3	'c'est prendre quelque chose qui est donné'	7.6	2.9	259
4	'ça modifie forcément ce qui est reçu'	2.0	2.6	250
5	'ça nécessite de l'énergie'	2.4	3.1	259
6	'ça implique que l'on garde ce qui est reçu'	4.4	3.5	260

Le caractère d'un événement subi de façon passive est bien repérable par les notes des items 1 et 2. Il est cependant surprenant de voir le sème "prendre ce qui est donné" si bien noté (item 3). Il s'agirait finalement de prendre sans intention et de façon passive.

Le fait que la nécessité d'énergie soit moins bien notée que dans le cas d'*émettre* (2,4 au lieu de 3,8) est évidemment en accord avec cette passivité.

Enfin, ce qui est reçu n'est pas forcément gardé (item 6) : ceci est parfaitement compatible avec la réception sonore.

IX.4.6.3 Recherche iconique

Les schémas proposés pour les huit phrases utilisant *recevoir* sont les suivants (figure IX.4-2) :

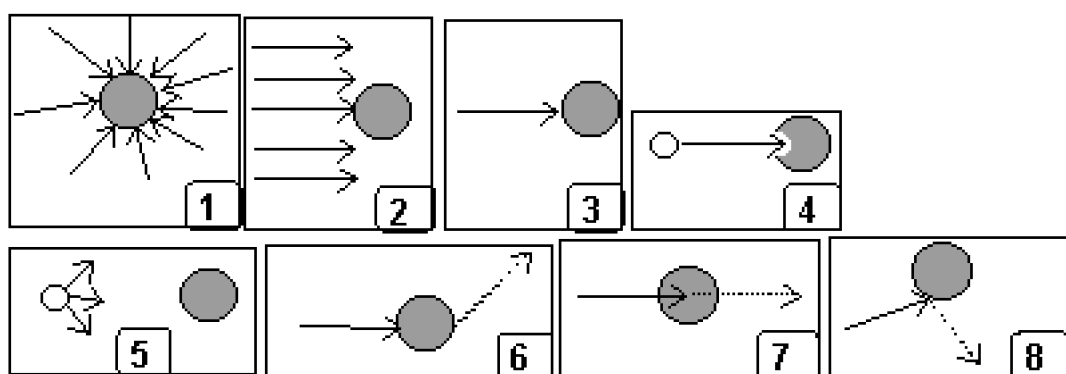


figure IX.4-2 : schémas proposés pour l'association avec différents usages de recevoir

Les grandes tendances observées sont (résultats complets en annexe) :

Recevoir un son : direction et localisation de la source Comme pour *émettre* nous constatons des différences fondamentales au sujet des traits caractéristiques de la réception des sons et de la lumière. Pour un son d'abord, la réception est plutôt **directionnelle**, issue d'une direction particulière (forts pourcentages des schémas 2 et 3 (entre 20 et 30%) pour les phrases *quelqu'un reçoit un son* ou *quelque chose reçoit un son*) : un tiers des élèves choisissent même le schéma 3 pour *quelqu'un reçoit un son*. Le son peut également être gardé par le récepteur (schéma 4) : 10% des réponses pour la phrase 1 (*quelque chose reçoit un son*) et 17% pour la phrase 2 (*quelqu'un*). Le son reçu et continuant son chemin (schémas 6, 7 et 8), n'est que peu mentionné. Le récepteur est donc privilégié. Il n'est pas étonnant que les élèves acceptent bien que le son n'existe qu'entre l'émetteur et le récepteur lorsqu'ils utilisent le modèle de la chaîne sonore (cf. partie B). Il faut aussi noter que la réception selon toutes les directions est également mentionnée, beaucoup plus pour un récepteur matériel que pour un récepteur humain. Il y a là un effet fort du trait intentionnel de la perception auditive. L'être humain *écoute* (intentionnellement le plus souvent) des sons dont la provenance est généralement identifiée alors que les objets inanimés n'ont pas cette capacité.

Des différences fondamentales entre son et lumière Les traits caractéristiques sont très différents lorsque l'usage fait intervenir la lumière comme entité reçue (phrases 3 et 8 pour des récepteurs respectivement humain et matériel). Le schéma le plus cité est à chaque fois le schéma n°1 (35% dans les deux cas). Nous retrouvons le point de vue symétrique à celui observé pour l'émission d'un son : la réception de la lumière peut également se faire selon toutes les directions. Ceci est normal, dans le monde sensible, tout baigne dans un bain de lumière dont les sources ne sont pas toujours localisables. Le schéma 3 disparaît quasiment complètement alors que le schéma 2 ("faisceau") reste assez cité (23%). La représentation "en rayon lumineux" sera pourtant adoptée dans les modèles fournis par l'optique géométrique. L'être humain semble davantage capable de garder la lumière reçue qu'un objet (le schéma 4 recueille 17% contre 5% pour *quelque chose qui reçoit*). Tout se passe comme si le fait de garder l'image en mémoire permettait de faire cette distinction. Il est également intéressant de noter que le schéma 5 dépasse les 10% (la lumière est émise dans toutes les directions), ce qui confirme ce qui a été vu à ce sujet pour *émettre*. De même l'idée de réflexion ou de renvoi est mentionnée de façon significative lorsque le récepteur est matériel (14% pour le schéma 8).

Autre remarques La réception de quelqu'un (phrase 4) ou d'un colis (phrase 5) est très largement représentée par le schéma 4 : ce qui est reçu est gardé, intégré, reste localisé au niveau du récepteur. Notons enfin la diversité des réponses concernant l'information, dont la nature floue ou variable semble disperser les réponses.

IX.4.6.4 Sèmes de récepteur

Nous complétons enfin cette étude par les sèmes retenus pour le terme récepteur, qui est

impliqué dans les appariements à effectuer pour représenter une chaîne sonore. Les résultats sont regroupés dans le tableau IX.4-8.

Tableau IX.4-8 : résultats de la question 5 pour *recevoir* (degré de vérité des phrases)

		Moyenne	Écart-type	N
1	Un récepteur c'est quelqu'un qui reçoit quelqu'un.	4.2	3.5	256
2	Un récepteur c'est quelqu'un qui reçoit quelque chose.	7.3	3.2	256
3	Un récepteur c'est quelque chose qui reçoit quelque chose	6.8	3.4	254
4	Un récepteur c'est quelqu'un qui reçoit	6.8	3.4	255
5	Un récepteur c'est quelque chose qui reçoit	7.3	3.2	256

C'est lorsque l'agent et l'entité reçue sont humains que la phrase est jugée "la moins vraie" : si la proposition a été comprise, il est en effet assez normal d'observer ceci. Pour désigner quelqu'un qui reçoit quelqu'un (chez soi), ce n'est pas le terme *récepteur* qui est adapté mais plutôt le terme *hôte*.

Toutes les autres propositions recueillent une note correcte, ce qui tend à montrer que la notion de récepteur est relativement souple, s'adaptant à des concepts variés. Les différences ne semblent pas assez grandes entre les quatre derniers items pour pouvoir en tirer des conclusions significatives.

IX.4.7 Résonner

Nous avons vu que le verbe *résonner* pouvait être spontanément utilisé par les enfants (cf. chapitre III) et qu'il pouvait être un outil langagier commun pour décrire certains phénomènes sonores. Nous avons vu également que l'action de résonner ou le fait de résonner ne sont pas évoqués dans le savoir à enseigner, laissant ainsi sans réponse les éventuelles questions de l'élève sur ce qu'est effectivement *résonner*. La physique, si elle utilise parfois le verbe résonner, préfère largement parler de *résonance*. Le substantif *résonance* qui désigne, de façon purement lexicale, l'action de résonner, connaît en effet des usages bien différents du verbe. Cette différence est manifeste dans les définitions du dictionnaire (cf. annexes) qui n'évoquent que le domaine sonore pour le verbe (pas de mention d'usage scientifique) alors que les usages scientifiques et spécialisés sont très

nombreux pour *résonance*. Le concept de résonance ainsi formé s'éloigne du verbe d'origine dont l'usage reste quotidien pour décrire certains phénomènes sonores, en accord avec son étymologie sonore (du latin *sonare* "faire entendre un son" d'après Picoche (1994)).

Nous travaillons ici sur le verbe, dont la connaissance par des élèves de seconde est plus sûre que celle de *résonance*. Malgré la monovalence du verbe (*un agent résonne*) il est intéressant d'observer les traits sémantiques attribués à résonner (nature de l'agent, conditions propices...).

IX.4.7.1 Spécificité d'usage et polysémie

Les phrases de l'évocation de contextes sont les suivantes :

1.
ça résonne tellement dans cette pièce qu'on ne peut pas se comprendre.
2.
On n'entendait rien mais tout à coup des pas se mirent à résonner sur la chaussée.
3.
Le bruit des avions qui décollent résonne contre les murs de la maison.
4.
Dans une fanfare, les bruits métalliques qu'on entend sont dus aux cymbales qui résonnent.
5.
Chaque matin, les cloches de l'église résonnent tellement fort qu'elles me réveillent.

L'évocation est donc ici purement sonore, en respect de la définition du petit Robert (cf. annexes). Nous avons par contre varié l'agent qui résonne. Notons qu'ici il était demandé de désigner la phrase pour laquelle l'emploi du mot est le plus adapté. Les résultats sont mentionnés dans le digramme IX.4-7.

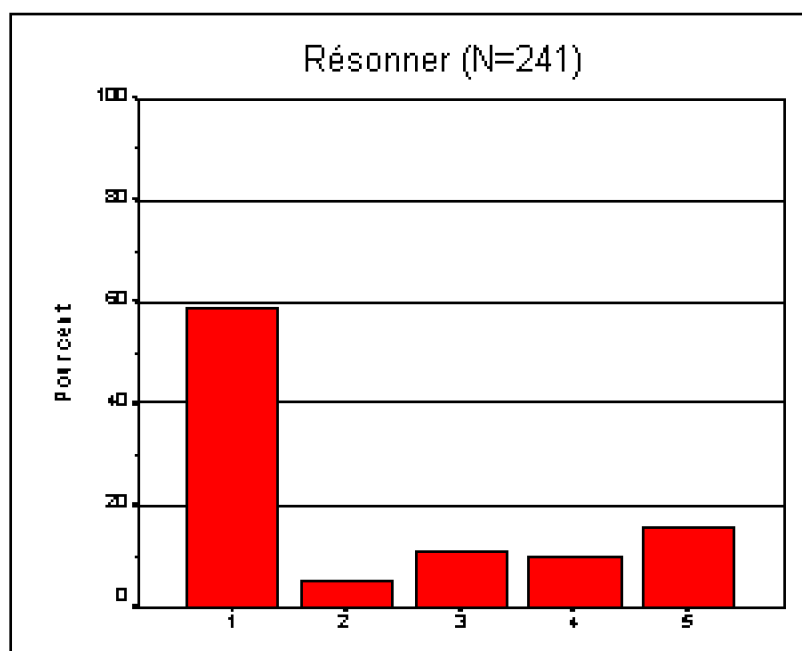


diagramme IX.4-7 : emploi adapté de résonner

C'est lorsque l'agent est indéfini que l'usage paraît le plus adapté aux élèves (59% choisissent la première phrase). L'expression "ça résonne" est en effet très courante en ayant généralement pour les enfants une source ludique (sous un pont on crie et ça résonne...). Les autres phrases sont relativement délaissées. Les pas, les cymbales et les cloches (dans une moindre mesure) ne sont pas reconnus comme des objets prototypiques pour résonner et *résonner contre* n'est pas vraiment jugé adapté.

IX.4.7.2 Recherche de sèmes

Les phrases proposées ayant des structures syntaxiques variées, elles ne sous-tendent pas forcément une propriété du verbe *résonner* (on pourrait davantage parler de propriétés pour le substantif). Nous avons donc demandé de noter le degré de vérité des phrases. Les résultats sont regroupés dans le tableau IX.4-9.

Tableau IX.4-9 : degré de vérité des phrases utilisant *résonner*

	Propriété	Moyenne	Écart-type	N
1	'Quelque chose peut se mettre à résonner tout seul.'	2.0	2.7	241
2	'Seuls un bruit ou un son peuvent résonner.'	6.9	3.4	240
3	'Ça nécessite un grand espace.'	4.3	3.5	236
4	'Un objet peut résonner.'	5.6	3.6	239
5	'Un bruit a plus de chance de résonner qu'un son.'	3.8	3.2	234
6	'On peut forcer un son à résonner.'	5.3	3.5	236
7	'Un son résonne plus ou moins fortement.'	7.5	2.6	234
8	'Quelque chose peut résonner dans ma tête.'	6.7	3.2	233
9	'Il faut un grand espace pour que quelque chose résonne.'	4.2	3.4	226
10	'Résonner, c'est une propriété qu'un son possède ou pas.'	3.4	3.3	230
11	'Un son peut résonner à l'intérieur d'un objet.'	6.5	3.1	230
12	'Un son résonne plus ou moins longtemps.'	8.2	2.2	235

Nous pouvons dégager les points suivants :

Les actants possibles : nous retrouvons ici la prédominance des sons comme actants pour le verbe *résonner*. L'item 2 (seul un bruit ou son peuvent résonner) est mieux noté

que l'item 4 pour un objet. Par contre il n'est pas fait de différence très significative à ce sujet entre bruit et son (item 5).

Les conditions pour résonner : l'item 1 indique clairement la nécessité d'un agent causal, confirmée par l'item 6 dont la note médiane laisse la possibilité d'un agent causal pour obliger un son à résonner. Il est relativement surprenant de constater que les notes des phrases 3 et 9 sur la nécessité d'un grand espace n'atteignent même pas la moyenne. Ces situations sont pourtant courantes mais cela indique que les élèves ont rencontré des conditions de résonance dans des situations où cette condition n'était pas remplie.

Les caractéristiques de l'action de résonner pour un son : la durée (item 12) et le caractère plus ou moins fort (item 7) semblent être pertinents pour décrire la résonance d'un son. Là encore, l'expérience des élèves semble riche. Par contre l'item 10 et sa faible note semble indiquer qu'un son peut se mettre à résonner ou cesser de le faire. La résonance d'un son n'est pas une propriété qui lui est inhérente.

Les lieux possibles de la résonance : la résonance "dans la tête" (item 8) est assez bien acceptée comme si le son continuait à résonner mentalement. Ce qui résonne dans la tête peut également être indéfini ("ça résonne dans ma tête"), possibilité qui était envisagée par l'emploi du sujet "quelque chose" dans cet item. Enfin, la résonance dans un objet, compatible avec le concept physique et dont l'intérêt historique pour l'acoustique est considérable (résonateurs d'Helmholtz) est assez bien noté. Ce dernier point peut donc constituer un point d'appui pour une introduction du concept de résonance dans l'enseignement élémentaire d'acoustique.

Globalement nous constatons une richesse relativement importante de la connaissance phénoménologique de la résonance sonore. Les élèves semblent avoir des idées assez bien marquées et cohérentes qui permettent de dégager des tendances importantes. Ces tendances ne semblent pas incompatibles avec le peu que pourrait dire à ce propos un enseignement élémentaire d'acoustique. Par contre, comme ces tendances sont très liées au sens commun, le décalage avec le concept de résonance transversal à différents domaines de la physique pourrait être très important. Il semble important que le concept de résonance en physique soit introduit en explicitant les liens, parfois complexes, avec la résonance sonore "quotidienne".

IX.4.8 Son

Ce dernier mot du questionnaire a évidemment un statut un peu particulier dans la suite des mots proposés puisqu'il apparaît comme leur dénominateur commun. La demande de désignation d'un usage spécifique aurait été fortement influencée par toutes les phrases et propriétés rencontrées antérieurement. Nous n'avons proposé ici que des propriétés, pour pouvoir dégager des traits sémantiques saillants, sans oublier cependant l'influence possible, ici également, des usages précédents. Les résultats sont regroupés dans le

tableau IX.4-10.

Tableau IX.4-10 : degré de vérité des propriétés de son

	Propriété	Moyenne	Écart-type	N
1	'Un son c'est un bruit agréable à entendre.'	4.3	2.9	253
2	'Un son c'est produit.'	6.3	3.4	249
3	'Un son ça se déplace vite.'	7.7	2.8	251
4	'Un son ça se propage d'un endroit à un autre.'	7.8	2.5	247
5	'Un son ça se mesure.'	6.7	3.4	246
6	'Un son ça s'entend.'	8.1	2.6	247
7	'Un son c'est une vibration.'	7.1	3.2	246
8	'Un son c'est une onde.'	6.8	3.0	243
9	'Un son c'est plus ou moins fort.'	8.5	2.1	246
10	'Un son c'est plus ou moins aigu.'	8.0	2.6	240
11	'Un son ça transporte de l'énergie.'	3.8	3.3	229
12	'Un son ça possède une forme.'	2.0	2.9	235
13	'Un son ça possède une fréquence.'	5.9	3.4	235
14	'Un son ça possède une intensité'	6.4	3.2	240

Nous dégageons ici les résultats essentiels, en regroupant les items selon la propriété évoquée :

L'importance de la perception auditive Les items attribuant une caractéristique permettant de décrire les sensations auditives sont très bien notés (item 9 et 10 en particulier). Le fait d'être fort ou aigu est donc reconnu comme caractéristique du son. De plus, le son est bien une entité qui s'entend (item 6), ce qui contribue, comme nous l'avons déjà dit à plusieurs reprises, à augmenter le décalage avec la physique. Ces trois items recueillent les trois meilleures notes. Notons cependant que le bruit n'est pas vraiment jugé plus désagréable que le son (item 1) : ceci est cohérent avec la distinction qu'effectue la physique à ce sujet (cf. partie A, chapitre II).

Assimilation à vibration et onde Les items 7 (vibration) et 8 (onde) sont également assez bien notés (autour de 7 sur 10). Nous avons fréquemment évoqué, au cours de ce travail, l'association assez souvent faite avant enseignement entre vibration et son (sans que la vibration ait un sens forcément très précis). Ceci est donc ici confirmé. Attribuer la notion d'onde au son ne semble pas non plus poser de problème. Reste à savoir ce que recouvre cette notion avant enseignement pour pouvoir affirmer que ceci est un point d'appui possible pour l'enseignement de la physique.

L'acception d'un déplacement rapide Cette association entre son et onde, celle-ci étant reconnue comme se déplaçant, semble cohérente avec le déplacement du son, également bien noté (items 3 et 4). Ceci confirme que le déplacement du son est une évidence pour la grande majorité des élèves de début de seconde. Le déplacement se fait plutôt vite (item 3) et le terme *propagation*, qui "scientifise" quelque peu cette description du déplacement est encore mieux noté.

Une caractérisation plus difficile par des concepts physiques Finalement, le son semble être pris comme un tout. En effet il peut relativement bien se mesurer (item 5) : ce qui est pensé ici est probablement la seule mesure du niveau acoustique, dont l'unité, le décibel, a diffusé dans la vie courante. Il est par contre relativement difficile aux élèves d'attribuer des propriétés physiques abstraites au son : l'item 13 (fréquence) n'est pas très bien noté, l'item 14 (intensité) pas beaucoup mieux (l'intensité est pourtant d'un usage plus courant que la fréquence). Ceci montre l'effort que devra faire l'enseignement pour relier fréquence et son (*via* la vibration) et justifie le point de vue central que le groupe SOC a donné à ce lien. Quant à la forme (qui pourra être évoquée par le savoir à enseigner au moment de définir le timbre), elle est rejetée.

IX.5 Conclusion pour l'enseignement

Il est remarquable de constater que les résultats de ce chapitre confirment, en particulier par une analyse du lexique, des usages spécifiques et des traits sémantiques caractéristiques, quelques-unes des grandes tendances dégagées dans le chapitre précédent à propos des systèmes explicatifs :

l'importance de la perception auditive ;

. la difficulté à attribuer des concepts physiques au son ;

. le possible appui de l'enseignement sur la notion de vibration ;

. une attention particulière à apporter pour la construction du concept de fréquence en association avec la vibration et avec le son ;

Ces résultats nous paraissent en particulier constituer de bons arguments pour justifier les choix du groupe SOC (importance du toucher, de la perception auditive, de la conceptualisation de la relation entre vibration et son), qui se sont révélés efficaces pour l'apprentissage (cf. chapitre précédent).

Les résultats ont également permis de mettre en évidence quelques faits nouveaux :

. la nature spécifique du son par rapport à la lumière ou aux ondes en général quant à l'émission, à la réception et, de fait, à la propagation : en particulier l'émission et la réception sonores sont bien plus directives que dans le cas de la lumière ;

. les faits de polysémie entre domaines de la physique qui peuvent s'avérer gênants pour l'apprentissage (cas d'*intensité* par exemple) mais également des séparations parfois bien nettes entre les différents sens (cas de *volume* par exemple)

. les notions dont l'utilisation par le discours scientifique ne semble pas poser de problèmes majeurs (*émettre* et *recevoir* par exemple).

Cette étude a donc montré son efficacité quant à l'analyse des possibles influences des faits de polysémie et de la variété des contextes d'usage sur l'apprentissage de concepts de la physique ayant également une facette notionnelle. Elle permet de dégager des points d'appui pour l'enseignement mais aussi les difficultés potentielles auxquelles il faut apporter une attention particulière.

Partie D : La simulation comme aide à la modélisation : *simulaSON*

La partie B a présenté une ingénierie qui donne une importance toute particulière à la vibration source d'un son, aux outils conceptuels nécessaires pour la caractériser et à un modèle microscopique (ou particulaire) de la propagation du son. Ces points centraux autour desquels s'articule l'ensemble de la progression du groupe SOC ont été justifiés par les hypothèses adoptées par ce groupe mais également par les développements théoriques de la partie A. Enfin, nous avons vu entre autres choses dans la partie C que les concepts introduits à ce sujet pouvaient être effectivement opératoires après enseignement pour les élèves ayant suivi cette progression.

Cependant la présentation de ce que le groupe SOC a appelé d'une part le *modèle de la vibration* d'autre part le *modèle microscopique de la propagation du son* a laissé entrevoir des limites d'utilisation et a permis d'envisager des difficultés de compréhension, d'assimilation et d'utilisation des modèles. D'une part ces modèles ont une présentation statique alors qu'ils devraient, par la nature même de ce qu'ils modélisent proposer des présentations dynamiques, d'autre part nous avons mentionné l'extrême difficulté d'une séparation cognitive de ce qui se passe dans le temps et de ce qui se passe dans l'espace lors de la propagation du son, séparation pourtant nécessaire à la bonne compréhension de la dépendance spatio-temporelle inhérente à l'onde sonore en particulier, au concept d'onde en général.

Nous proposons ici un développement informatique qui permet l'utilisation de

simulations basées sur les modèles décrits. Précisons bien que si elle s'inscrit dans la logique du travail réalisé par le groupe SOC, cette simulation n'a pas été intégrée dans l'enseignement élaboré par ce groupe SOC, pour des raisons essentiellement chronologiques. Elle doit donc apparaître comme un prolongement des réflexions du présent travail et comme un moyen d'en concrétiser certains aspects.

Le sujet, les hypothèses adoptées et les réalisations concrètes sont assez différents de ceux abordés précédemment. Ces différences justifient donc de faire de la présentation du logiciel une partie à part entière. Cependant, cette partie ne comporte qu'un seul chapitre, largement suffisant pour présenter à la fois les aspects théoriques, dont certains ont déjà été débattus, et les aspects pratiques.

Chapitre X Hypothèses d'élaboration et présentation de *simulaSON*

X.1 Cadre général du développement du logiciel

X.1.1 Type de travail effectué

La place de plus en plus importante de l'ordinateur dans l'enseignement secondaire a sans conteste pu, dans certains cas, apporter de nouvelles possibilités et donc une amélioration des conditions propices à l'apprentissage. Cette place croissante de l'outil informatique a d'une part rapidement ouvert de nouvelles problématiques et voies de recherche pour la didactique (rôle de l'ordinateur dans le milieu, nouveaux savoir-faire, hypothèses d'apprentissage spécifiques, modification des activités, influence de l'intelligence artificielle), d'autre part demandé à cette même discipline de nouveaux outils théoriques d'élaboration de logiciels pédagogiques (Beaufils et Richoux, 1996 ; Durey et Beaufils, 1998). Les expérimentations avec certains de ces logiciels ont dans certains cas pu permettre des rétroactions pour de nouvelles versions améliorées.

Nous nous bornons pour notre part à une partie seulement de la chaîne complète hypothèses-élaboration-expérimentation-modification. Si nous avons clairement pris en compte des hypothèses d'apprentissage, une réflexion particulière sur le sujet précis qui nous intéresse (d'ordre didactique mais aussi phénoménologique) et des hypothèses sur les représentations et la nature des "objets" mis en jeux avec ce type d'outil, nous ne présenterons pas dans le cadre de cette thèse d'expérimentation et de résultats de recherche issus de l'utilisation, par les élèves, du logiciel que nous avons élaboré.

Le logiciel présenté s'appelle *simulaSON*, contraction évidente de *simulation* et *son*. Il a été entièrement développé par nos soins⁴¹. Son ergonomie est extrêmement simple, et est basée sur une interactivité forte puisqu'il permet l'observation simultanée et en temps réel des modifications sur plusieurs représentations qui résultent d'actions de l'utilisateur. Les supports d'information sont essentiellement constitués par de l'image (toujours de

synthèse) et du son.

X.1.2 Cadre d'utilisation du logiciel

X.1.2.1 ntégration possible dans l'enseignement institutionnel

SimulaSON est un logiciel de simulation dont l'utilisateur visé est l'élève. Sa facilité d'utilisation rend les compétences "techniques" requises extrêmement réduites : on peut même dire que la seule compétence requise est la manipulation de la souris.

L'utilisation doit être accompagnée de documents sur support papier, que nous détaillerons plus loin.

Même si l'utilisation de l'ordinateur n'est pas mentionnée dans les consignes officielles du programme de seconde pour les sujets qu'aborde le logiciel (essentiellement, pour faire vite, la vibration en lien avec les sons perçus, les mécanismes de propagation, les concepts de vitesse du son et de longueur d'onde), nous considérons que *simulaSON* peut être intégré à l'enseignement curriculaire de seconde. Il nous paraît de plus important que *simulaSON* soit réellement intégré à la progression, en devenant un outil de référence auquel l'élève peut avoir recours régulièrement au cours de l'enseignement. Nous estimons en effet à la suite de Beaufils et Richoux (1996) que **"l'introduction de cet ordinateur "outil d'investigation scientifique" ne peut être tangible que si, d'une part, les utilisations sont d'abord celles des élèves et, d'autre part, qu'elles sont en nombre suffisant et articulées dans une progression cohérente"** (p.8). La proximité épistémologique et conceptuelle du logiciel avec l'enseignement proposée par le groupe SOC rend l'intégration d'autant plus facile dans cet enseignement.

L'utilisation de *simulaSON* en classe n'a pas encore fait l'objet d'une recherche spécifique. Cependant le logiciel a effectivement été utilisé dans plusieurs classes de seconde de la région lyonnaise, sur plusieurs séances. Nous évoquerons également, à la fin de ce chapitre, le travail d'un mémoire professionnel d'IUFM qui a testé son utilisation.

Pour fixer le cadre d'utilisation, pas vraiment séparable du logiciel lui-même, une séquence de tâches est proposée avec le logiciel (ne serait-ce que pour guider les enseignants qui ont choisi de s'en servir avec leurs élèves). La version fournie sur la disquette jointe au présent manuscrit propose une utilisation libre ou séquentialisée par ces différentes tâches. La succession des tâches proposées est mentionnée en annexe.

X.1.2.2 Type d'utilisation de l'ordinateur (validation expérimentale d'un comportement théorique)

⁴¹ *simulaSON* est une projection Macromedia Director[®]. C'est une application programmée en langage Lingo. Le logiciel (zippé) est fourni sur la disquette jointe. Une fois dézippée, il suffit de lancer cette application en double-cliquant sur l'icône intitulée *simulaSON*. Cette application peut être lue sur n'importe quel PC (à partir de 486) dans l'environnement Windows, mais il est préférable d'utiliser un processeur de performance au moins égale à 166 MHz. *simulaSON* est également téléchargeable à l'adresse suivante : <http://sir.univ-lyon2.fr/GRIC-COAST/Home/jvince/simulaSON/telecharge.html>

Dans l'important ouvrage qu'ils consacrent à l'intégration de l'ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques au lycée, Beaufils et Richoux (1996) étudient la légitimation de l'utilisation de l'outil informatique par la référence aux "pratiques de laboratoire" du physicien. Ils mettent en évidence qu'au lieu de pratiques "savantes", les démarches mises en oeuvre dans l'enseignement avec l'ordinateur semblent spécifiques à l'enseignement. La relation approfondie entre théorie et expérience est cependant centrale dans ces utilisations. Si nous considérons comme ces auteurs, que dans le "paradigme standard" qui résulte de cette référence, les outils utilisés sont fortement associés à la mesure, alors nous sortons ici quelque peu de ce paradigme.

En effet, *simulaSON* n'est interfacé à aucun capteur. Il ne donne pas de représentation de mesures effectuées dans le champ expérimental. Il ne donne pas non plus de solution numérique à une équation différentielle que l'utilisateur aurait fourni sans savoir la résoudre. En ce sens, *simulaSON* est beaucoup plus proche d'un micromonde (qui permet de manipuler ou de mener des actions sur des "objets" virtuels) que d'un logiciel d'acquisition et traitement de données.

Beaufils et Richoux (1996) distinguent trois activités principales menées couramment dans le paradigme standard au sujet de la relation entre modèles et mesures, en s'appuyant sur les pratiques de référence à ce sujet :

la modélisation descriptive : activité classique qui consiste à faire des mesures puis, à partir d'une représentation graphique, à trouver une relation quantitative entre les grandeurs mesurées ou entre des grandeurs calculées à partir de celles mesurées ;

la modélisation interprétative : il s'agit là à partir des données d'effectuer une "modélisation théorique du système et du phénomène" pour aboutir à des relations entre différentes grandeurs et éventuellement des représentations graphiques. La résolution numérique d'équations différentielles peut par exemple être très utile dans cette stratégie. Les résultats théoriques peuvent alors être comparés aux mesures ;

la **validation expérimentale d'un comportement théorique** : cette activité ne donne pas lieu à des mesures préalables mais utilise la simulation, validée par l'expérience.

Comme *simulaSON* sort du paradigme standard d'utilisation, il est évidemment difficile de décrire les activités permises par *simulaSON* grâce à cette typologie. C'est en particulier le cas des deux premières activités qui donnent un rôle majeur à la mesure dans le monde des objets et des événements. Dans notre cas, cette absence de la mesure n'empêche aucunement l'activité de modélisation grâce au logiciel. Il faudra juste veiller à proposer des activités spécifiques de mise en relation entre ce qui est visualisé à l'écran (dont la nature devra être explicitée pour l'élève) et les objets et événements réels. Certaines stratégies d'utilisation de *simulaSON* ont d'ailleurs quelques points communs avec la troisième activité décrite ci-dessus (la validation expérimentale d'un comportement théorique), qui implique bien l'établissement de liens entre modèle et champ expérimental. Pour Beaufils et Richoux (1996), dans ce type d'activité, l'investigation est d'abord

théorique, l'expérience étant à la fois "le retour et le recours". ***"Le modèle physico-mathématique d'un système une fois établi à partir des équations de la physique peut être mis en fonctionnement par simulation numérique : la manipulation est alors celle du modèle et l'exploration peut mettre en évidence un comportement inattendu qui demandera alors à être confronté à l'expérience"*** (p.13). Il convient cependant de préciser quelques points spécifiques à *simulaSON* :

- la simulation est graphique et qualitative (l'essentiel des aspects numériques implémentés est caché pour l'élève) ;

- le modèle mathématique utilisé et implémenté n'est pas établi en classe par l'élève et n'est même pas explicité. Le modèle qualitatif qui est censé être mis en animation par la simulation est par contre fourni à l'élève ;

- le retour et le recours vers l'expérience se font d'abord ici au niveau du monde de la simulation (que se passe-t-il avec des entités qui sont gouvernées par ce modèle ?) par l'étude d'expériences simulées. Après ce lien entre théorie et objets virtuels, des liens peuvent être établis, lors d'autres phases, entre ce qui est observé à l'écran et le champ expérimental : ce passage du monde simulé au champ expérimental doit constituer de notre point de vue une activité à part entière.

Ainsi, *simulaSON* permet de simuler un comportement théorique qui pourra être validé expérimentalement. Les aspects théoriques implémentés (en particulier la forme mathématique générale d'une onde plane progressive sinusoïdale) permettent de visualiser à l'écran un comportement théorique d'un autre ordre mais observable (comportement particulière par exemple). Ce qui est fait traditionnellement par la mise en équation et l'analyse des dépendances de facteurs (ce qui permet d'élaborer une expérience de validation) est ici fait grâce au logiciel, de façon qualitative. La validation expérimentale reste ensuite à faire à partir de cette instantiation d'un comportement théorique.

Pour donner un exemple concret dans notre cas, nous reprenons l'exemple choisi par Beaufls et Richoux (1996, p.14) pour illustrer ce type d'utilisation. La première ligne du tableau X.1-1 décrit ce processus de "validation expérimentale d'un comportement théorique" dans le cas d'un circuit électrique oscillant. Les lois connues permettent d'élaborer une équation différentielle dont les solutions sont données par simulation. Ces solutions mettent en évidence l'existence d'une valeur critique de la résistance pour observer différents régimes. Ceci permet alors d'élaborer une expérience pour vérifier ce résultat issu de la théorie et de la simulation. La deuxième ligne du tableau décrit le processus analogue pour la propagation acoustique : les lois adaptées permettent d'établir l'équation d'onde, la simulation donne des solutions (de type propagatives harmoniques par exemple), ce qui permet par exemple d'envisager une expérience qui va par exemple permettre de mesurer la longueur d'onde et de vérifier sa relation avec la période. Ce processus ne peut cependant pas être envisagé en seconde (à cause du

formalisme en particulier) mais est classique dans l'enseignement supérieur.

Tableau X.1-1: exemples de processus de validation expérimentale et rôle de la simulation graphique

Règles théoriques	comportement théorique du système	Validation
$U=RI$, lois électriques pour C et L	équation différentielle + simulation numérique (mise en évidence d'une valeur critique pour R)	Mise au point d'une expérience
Lois de la mécanique Conservation de la matière	Équation d'onde + simulation numérique	Expérience pour mesurer λ et vérifier $\lambda=vT$ par ex.
Règles qualitatives d'interaction des particules	Simulation par l'image animée	Expérience pour mesurer λ et vérifier $\lambda=vT$ par ex.

La troisième ligne décrit ce qui est fait, du point de vue de l'élève, grâce à la simulation animée proposée par *simulaSON*. Les règles qualitatives du modèle fourni à l'élève remplace les lois fondamentales de la physique, la simulation par représentation animée remplace la simulation numérique. Il est alors possible d'élaborer une expérience similaire à celle mise au point dans le cas de la simulation numérique, dont l'interprétation et le sens peuvent être différents mais dont les objectifs sont les mêmes.

SimulaSON apparaît donc comme un **logiciel de simulations de modèles essentiellement qualitatifs, par animation virtuelle**. Nous discuterons plus loin de la nature effective de ce que propose le logiciel (simulation ou simple représentation animée de règles mathématiques ?).

X.2 Apport de la simulation animée dans le cas du son

X.2.1 De la nécessité de faire vivre les modèles proposés

X.2.1.1 Rappel sur la difficulté de représentation du concept d'onde

Le concept d'onde, les mécanismes de propagation, la dépendance spatio-temporelle inhérente posent d'importants problèmes au savoir à enseigner dans les cas où il est hors de question d'utiliser un formalisme mathématique puissant mais complexe pour décrire ces phénomènes. Nous avons déjà mentionné ces difficultés. Nous citons ici des extraits des premières réflexions de l'actuel Groupe Technique Disciplinaire (1999) sur les principes directeurs pour l'élaboration des nouveaux programmes qui pointaient certaines de ces difficultés à donner une représentation du concept d'onde :

"La notion d'onde est probablement la plus délicate du programme actuel, et qui passe le moins bien. Comment faire comprendre la "double périodicité", longueur d'onde et période ? Faut-il faire tracer des courbes représentatives de la déformation de milieu à des instants différents Chacun sent confusément que ce n'est pas la bonne voie... Mais quels objectifs peut-on donner à l'observation des

ondes en seconde ?".

Le même texte propose ensuite un recours, classique mais dangereux comme nous l'avons déjà vu, aux analogies (surface d'un lac, corde tendue, ressort). Le ressort est même proposé pour introduire des concepts fondamentaux et mener des activités expérimentales à leur sujet. Certaines affirmations et propositions du passage qui suit nous paraissent peu fondées et parfois illusoires :

On pourrait mesurer la vitesse de propagation d'une onde sur un ressort plus ou moins tendu. Si l'excitation est périodique, on génère un train d'onde périodique. Les notions de longueur d'onde, de période et de vitesse pourraient être observées à l'aide d'une caméra et d'un magnétoscope avec arrêt sur image. La longueur d'onde s'identifie par la distance séparant deux crêtes successives, la période en observant le mouvement en un endroit donné. D'où la question : y a-t-il une relation entre longueur d'onde, période et vitesse ? Et sa réponse par des mesures. Ces notions étant acquises, on pourrait observer au stroboscope le mouvement d'un haut-parleur, et analyser qualitativement le mouvement induit sur les molécules d'air : les élèves seraient amenés à appliquer la notion de propagation d'une déformation à une situation où l'on ne voit pas le mouvement du milieu mais seulement celui de la source de la perturbation. Il nous semble que l'on peut alors assez naturellement obtenir des élèves eux-mêmes une représentation correcte de ce qu'est une onde acoustique comme onde longitudinale, en se servant de l'analogie du ressort. Faut-il mesurer la relation $\lambda = vT$ avec des ondes acoustiques ? Ce n'est pas certain. Quant à mentionner que la lumière est elle aussi une onde, sans détail supplémentaire autre que l'existence d'une vitesse finie, c'est sans doute possible. Une progression de ce type ne sera-t-elle pas plus efficace que celle consistant à "observer" une sinusoïde sur un écran d'oscilloscope, produit ultime d'une chaîne de capteurs et de transformations à partir d'ultrasons tout aussi inaudibles qu'invisibles...

Nous ne pouvons par contre que partager cet objectif louable de la fin de ce texte :

Il faut veiller à ce que l'instrumentation ne masque pas le phénomène, et que l'onde ne soit identifiée à cette courbe sur l'écran de l'oscillo : la mystification risquerait d'être complète

X.2.1.2 Une articulation forte avec les modèles écrits proposés par SOC

Nous avons déjà dit le danger, de notre point de vue, de ce type de recours à une analogie qui devient le sujet principal. Si nous pouvons partager le diagnostic sur les difficultés et les objectifs, nous ne proposons pas ici les mêmes remèdes. Les propositions ci-dessus du GTD nous paraissent maîtrisables que par le physicien qui *sait* déjà. Procéder de la sorte reviendrait à renoncer à étudier le son. Ce texte exprime cependant le besoin de représentations animées pour le concept d'onde.

Nous avons décrit dans la partie B les raisons pour lesquelles il nous paraît essentiel de proposer aux élèves un modèle de la vibration pour la création sonore et un modèle particulière de la propagation du son (§ VI.4.). Nous ne revenons pas ici sur ces aspects, explicités également dans d'autres travaux (Arnaud, 1997 ; Robles, 1997). Rappelons juste que ce qui motive une telle entreprise tient essentiellement :

- à la difficulté d'observation visuelle qui a elle-même plusieurs causes (impossibilité d'observer à l'oeil nu autre chose que des phénomènes macroscopiques, rapidité des événements, petitesse des amplitudes en jeu, nature du milieu...) ; certains de ces éléments ont également pu motiver l'élaboration d'autres simulations particulières (Méheut, 1996) ;

- à la complexité des phénomènes en jeu et des instruments de mesures traditionnellement utilisés à ce sujet dans l'enseignement (microphones, oscilloscope).

Nous avons également présenté les avantages spécifiques d'un tel modèle :

- lien explicite entre ce qui se passe au niveau de la vibration et ce qui est perçu ;

- proposition d'un mécanisme descriptif pour illustrer comment l'information vibratoire se propage ;

- découplage de ce qui se passe dans le temps d'une part, dans l'espace d'autre part pour pouvoir dans un second temps mieux faire le lien entre les deux évolutions ;

- représentation particulière du concept de longueur d'onde.

Cependant, cette étude avait déjà permis de dégager quelques limites importantes. En particulier, avec un tel modèle écrit, nous avons uniquement recours à des représentations à un instant donné ou à un endroit donné, si bien que la propagation des zones comprimées ne peut être que pensée, mais pas encore visualisée. L'influence de la fréquence et de l'amplitude de vibration sur le mouvement de la source, sur la modification du milieu et sur la longueur d'onde reste à la charge de l'élève, puisqu'il doit pouvoir les générer mentalement (et par l'imagination) en faisant fonctionner le modèle au mieux. De même, la vitesse reste un concept qui n'est pas représenté dans ce modèle. Il nous est apparu très vite, à la suite d'autres travaux (Arnaud, 1997 ; Robles, 1997 ; Foley, 1994) que l'image animée pouvait apporter une contribution tout à fait déterminante pour résoudre, au moins en partie, ces difficultés.

La manipulation du modèle peut de notre point de vue en accroître la compréhension et les possibilités d'utilisation en référence au monde des objets et des événements. Le point de vue de Durey et Beauvils (1998) cité ci-dessous nous paraît à ce titre être une bonne synthèse du processus éventuel par lequel faire vivre le modèle est une voie fructueuse pour l'apprentissage :

"Les activités de manipulation de modèles et d'expérimentation sur modèle, clairement situées dans le champ théorique, sont donc a priori tout à fait pertinentes du point de vue de l'apprentissage des sciences. On peut même faire l'hypothèse que, étant plus claires dans leurs objectifs et dans la relation à leur champ de référence (les modèles et les théories) que ne le sont, de leur côté, les

expériences de classes par rapport aux démarches expérimentales, ces activités seront porteuses d'une meilleure structuration/conceptualisation des connaissances" (Durey & Beaufiles, 1998, p. 72).

SimulaSON propose donc des simulations qui permettent la manipulation, "l'expérimentation sur les modèles" (Grémy, 1985) suivants :

- modèle de la vibration pour la création sonore ;

- modèle particulière de la propagation du son.

Après une analyse critique des différentes réalisations au sujet des ondes, présentée dans le paragraphe suivant, nous verrons en quoi la simulation par l'image animée que nous proposons s'écarte de ces réalisations.

X.2.2 Les travaux existants

X.2.2.1 Animations au sujet des ondes

On trouve maintenant sur Internet, de nombreuses animations, illustrant le principe de propagation d'ondes longitudinales ou transversales. Le symbolisme utilisé est rarement explicite. Les outils interactifs sont variés mais l'interactivité n'est jamais vraiment très élevée : par exemple, on ne peut choisir que trois valeurs différentes pour la fréquence ou pour la longueur d'onde. De plus, les modifications ont rarement lieu en temps réel, il y a toujours un décalage entre les choix de l'utilisateur et la visualisation effective.

Nous pouvons citer parmi d'autres les exemples suivants, dont nous donnons chaque fois un exemple figé (capture d'image) :

- L'animation proposée à ce sujet par le site ExploreScience.com⁴² (Animation Flash Macromedia) :

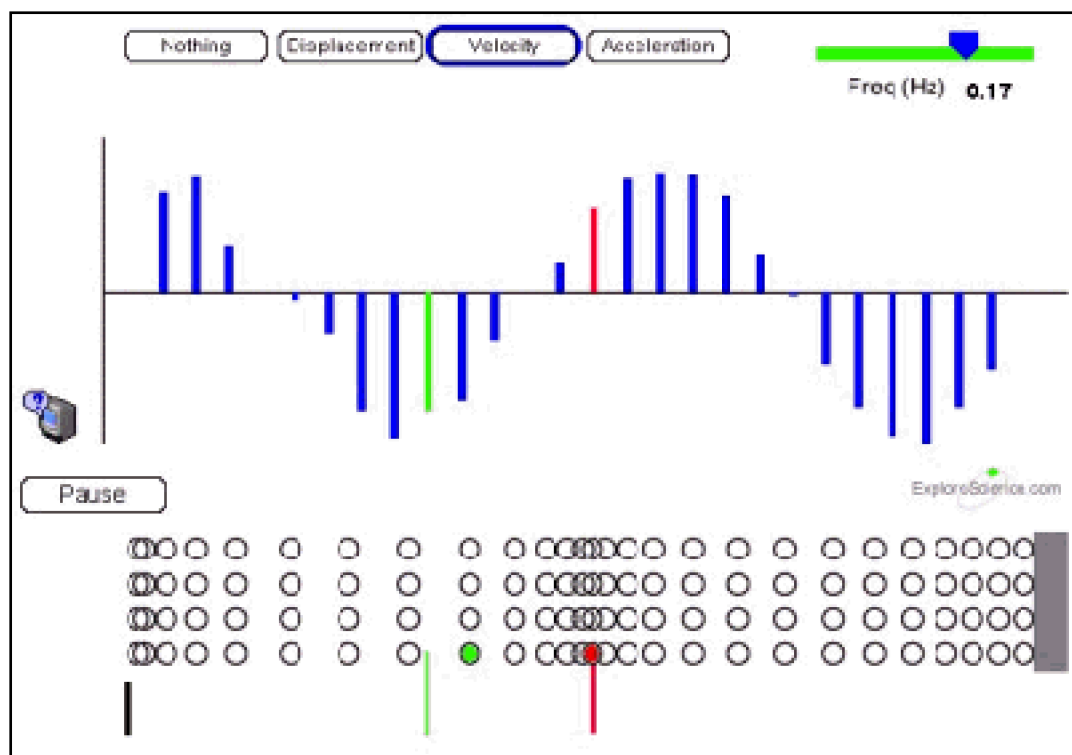


figure X.2-1 : animation proposée par le site explorescience.com

l'animation proposée par J.-J. Rousseau de la faculté du Mans⁴³ (Applet Java) :



figure X.2-2 : animation proposée par J.-J. Rousseau (Le Mans)

⁴³ l'animation de Surendranath⁴⁴ (professeur de physique à Hyderabad, Inde) (Applet

Java) :

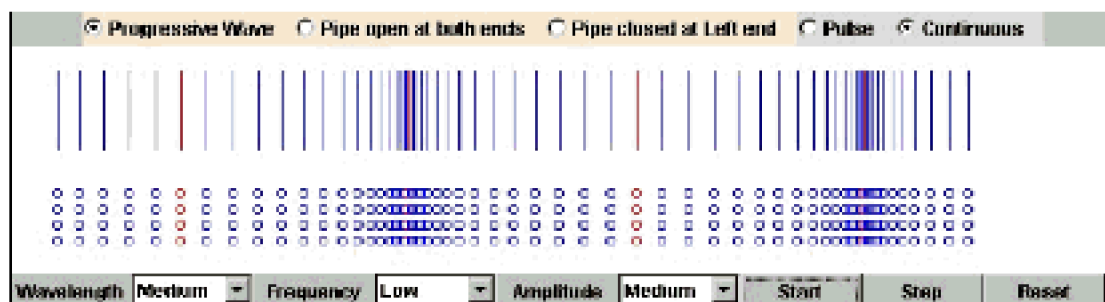


figure X.2-3 : animation proposée par Surendranath (Inde)

l'animation de Phillip Dukes, de Brigham Young University⁴⁵ (Applet Java).

Toutes ces animations sont présentées comme des animations sur les ondes, et ne sont pas spécifiques au son. Elles s'adressent essentiellement à des étudiants de niveau universitaire et ne sont pas intégrées à des progressions d'enseignement spécifiques.

De plus elles ont comme point commun de faire se déplacer des traits verticaux discontinus (pour les ondes longitudinales), dont on ne sait pas vraiment à quoi ils correspondent. Ces traits servent en fait à repérer l'amplitude de la grandeur oscillante à un endroit donné au cours du temps. Nous sommes loin, ici d'une structure particulière de la matière. En fait ces animations n'ont pas de référent expérimental identifié puisqu'elles sont sensées illustrer le phénomène d'onde longitudinale (elles sont présentées comme telles), commun à plusieurs domaines ondulatoires. L'articulation avec l'expérience n'est jamais proposée. Les animations se situent entièrement au niveau du monde des théories et des modèles.

Ces exemples permettent cependant d'observer les possibilités fournies à ce sujet par l'outil informatique (suivi par coloriage d'un élément particulier, variation des paramètres, représentation graphiques simultanées...).

X.2.2.2 Animations au sujet de la propagation du son

Une première animation a été réalisée à l'équipe COAST par A. Robles dans le cadre de sa thèse (Robles, 1997). Cette animation n'utilisait cependant pas l'outil informatique et l'image de synthèse mais une image vidéo d'un "modèle matérialisé". Il s'agissait de petits aimants en agitation répulsive sur un coussin d'air. Ce modèle matérialisé permet en effet de montrer comme une impulsion mécanique (un aller-retour en fait) peut se propager à travers le milieu matérialisé par ces petits aimants en agitation incessante. L'apport incontestable d'un tel film (dans lequel il est en plus fait explicitement le lien entre objet du monde réel et objets du modèle matérialisé) est tel que le groupe SOC l'a intégré à sa progression pour illustrer les premiers aspects microscopiques de la propagation. Malgré ces avantages, les contraintes du dispositif (trop faible nombre d'aimants, faible taille du

⁴⁴ <http://members.xoom.com/Surendranath/Lwave/Lwave01.html>

⁴⁵ <http://wigner.byu.edu/WaveTrans/TabbedWaveTrans.htm>

réceptif, amortissement très fort de l'impulsion, rebonds sur les parois) ne permettent pas de simuler la propagation de vibration. Même pour simuler la propagation d'une impulsion (un aller-retour), il n'est pas facile d'affirmer qu'il n'y a pas déplacement global de matière (certains aimants ne reviennent pas). Enfin, ce type de modèle matérialisé, non présent dans la classe, ne permet bien évidemment aucune activité.

L'outil informatique peut s'avérer alors très utile.

Foley (1995) a réalisé un important travail dont les objectifs sont assez proches des nôtres. Le logiciel qu'il a développé (appelé *AudioDissector*) a largement inspiré nos choix et les représentations graphiques que nous avons adoptées. Un exemple d'interface est donné sur la figure X.2-4.

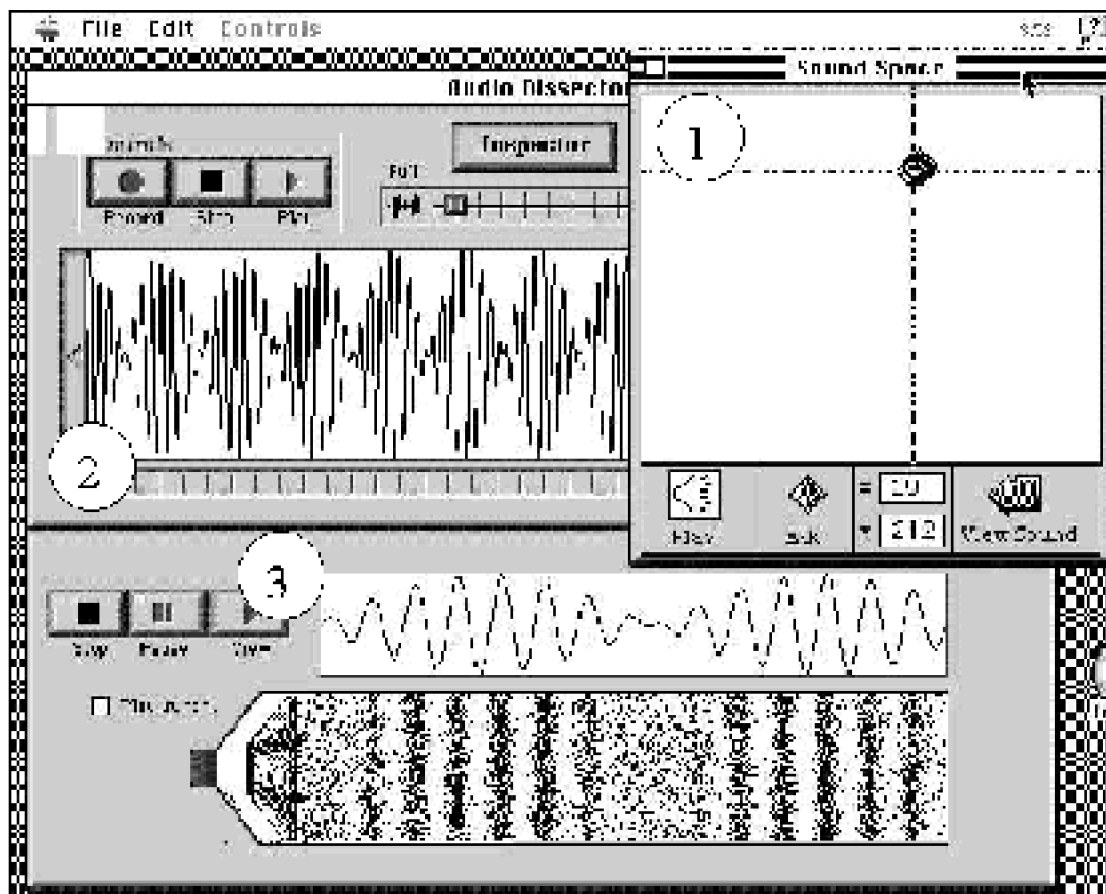


figure X.2-4 : exemple d'interface du logiciel AudioDissector de B. Foley (1995)

La fenêtre appelée "Sound Space" (que nous avons notée 1 sur la figure) constitue l'espace sonore des sons représentés par un losange. Sans que ce soit explicite les axes de cet espace correspondent à la hauteur et au volume du son (les abscisses données

explicitement sont purement graphiques). L'utilisateur peut ajouter des sons dans cet espace. Comme chaque son est pur, l'ajout de sons dans l'espace sonore permet la synthèse de sons complexes. Il est possible d'écouter le son résultant (sans information sur les propriétés physiques du son perçu). Dans la fenêtre du haut (2), la forme d'onde (vibration en fonction du temps) est donnée. Dans la fenêtre du bas (3), et c'est là la plus grande originalité, c'est le signal acoustique en fonction de l'espace dans un tuyau sonore qui est représenté. Ce qui est représenté est en fait la densité de point de la représentation microscopique située en dessous (sur le même axe spatial). La finesse des points représentant les particules permet de figurer des signaux assez complexes. Au cours du temps, dans cette fenêtre, la courbe se déplace, ainsi que la représentation particulière, en fonction de la vibration de la source. La répartition de densité se dessine donc au fur et à mesure. Par contre, si l'utilisateur change le son dans l'espace sonore, les modifications ne s'effectuent pas en temps réel.

Foley affirme que **chaque fenêtre fournit un modèle différent du son, chacun mettant en avant un aspect particulier du son.**

Ce logiciel de simulation a été élaboré avec des hypothèses issues de la recherche en éducation. Il a été intégré à une progression (laissant une place essentielle à l'expérience réelle) et son influence a été testée avec des étudiants. L'effet semble positif sur toutes les questions concernant la réflexion, l'absorption, la vitesse du son, la nature du son, la transmission, la hauteur, le volume et la conservation de l'énergie (Foley, 1995).

Si l'apport d'un tel outil sur la compréhension des phénomènes sonores semble indéniable, le logiciel proposé nous a semblé pouvoir être largement amélioré, en cohérence avec le programme de seconde. Nous reprendrons à notre compte :

- l'idée selon laquelle il peut être utile de séparer explicitement les différentes représentations du son, en particulier spatiale (y compris microscopique) et temporelle ;

- la possibilité d'écoute du son correspondant (il faudra cependant préciser la nature et les termes de cette correspondance).

Cependant, nous pointons quelques inconvénients qui nous paraissent pouvoir induire des idées fausses ou incorrectes du point de vue de la physique et empêcher la construction du sens des concepts en jeu :

- Les axes ne sont pas précisés dans l'espace sonore. Quelle relation y a-t-il entre les paramètres du son et les graphes ?

- La représentation temporelle, que Foley affirme présenter parce qu'elle est la plus courante dans la vie quotidienne, ne précise pas la nature de l'axe des abscisses. De plus, à quoi correspond effectivement cette courbe ? A l'évolution de l'amplitude de la source ou à l'évolution de la densité en un point donné du milieu ?

Le logiciel ne permet pas de visualiser la vibration de la source, représentée ici par un haut-parleur. Ceci suppose que les concepts d'amplitude et de fréquence sont parfaitement acquis, ce qui, nous l'avons vu, est loin d'être le cas en seconde. Cette représentation de la vibration aurait pu permettre une meilleure compréhension de ce qui se passe microscopiquement. Le fait que cette vibration ne soit pas visible est relié au point suivant.

Dans le tuyau sonore, l'image représentant le milieu de propagation se déplace "en bloc". La petitesse des particules fait que nous ne pouvons pas suivre une particule particulière pour tenter de comprendre ce qui lui arrive et comment elle interagit avec ses voisines. En fait, ce qui semble implémenté est la courbe de densité en fonction de l'espace. Cette courbe détermine la densité de points à afficher. Au cours du temps la courbe se déplace et nous avons l'impression que le motif microscopique se déplace également. Il paraît donc difficile, avec cette simulation, d'inférer le non-déplacement de matière. La matière semble "créée" à gauche du tuyau. Nous nous sommes dans notre logiciel largement écartés de ce type d'implémentation. Notons d'ailleurs que Foley ne semble pas proposer avec *AudioDissector* de modèle particulaire de la propagation du son (au sens où il décrirait le type d'interaction entre particules et les conséquences pour la transmission de l'information).

À partir de ce qui nous semble positif à bien des égards dans *Audiodissector*, nous avons cherché à améliorer ou à remplacer les aspects qui ne nous semblaient pas en accord avec l'analyse du savoir que nous avons menée et avec les connaissances des élèves auxquels s'adresse *simulaSON*.

X.3 Simulation et modèles. Statut du monde de la simulation

X.3.1 Cadre théorique

Nous avons largement exposé l'importance que revêtent pour l'apprentissage les liens effectués par l'élève entre le monde des théories et des modèles et le monde des objets et des événements. Nous avons vu également que les événements essentiels relatifs aux phénomènes sonores étaient invisibles à l'oeil nu. Nous proposons donc, comme dans les animations présentées dans le paragraphe précédent, de recourir à *des objets et des événements de simulation* (nous préférons cette expression à celle, peut-être plus courante, d'objet "simulé", qui renvoie de notre point de vue au référent réel). Ces entités permettent de donner une représentation des concepts en jeu (*via* la "manipulation" de ces concepts). Ces entités virtuelles, observables et "manipulables", ne sont ni des objets réels, ni des éléments du monde des théories/modèles. Ils servent d'intermédiaires, dans l'activité de résolution de problème, entre le *monde des objets/événements* et le *monde des modèles* : nous appellerons par la suite ce qui est représenté à l'écran le *monde de la simulation* (figure X.3-1), puisque tous les éléments graphiques représentés dans *simulaSON* font partie de ce monde.

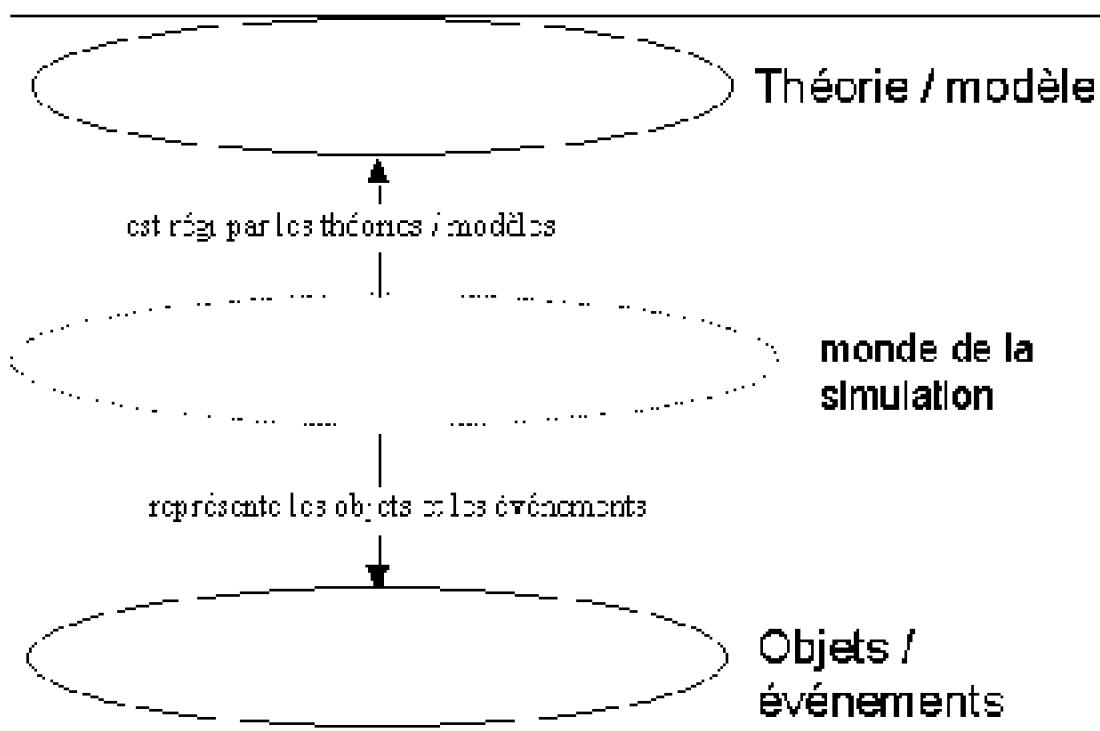


figure X.3-1 : le monde de la simulation comme intermédiaire entre théorie/modèles et objets/événements

Nous utilisons ainsi la simulation comme lien privilégié entre le théorique et l'expérimental : **"La simulation n'a de sens que par rapport à une réalité que l'on tente d'appréhender. Elle doit être un lien privilégié entre le théorique et l'expérimental, non un fossé de séparation"** (Beaufils et al., 1987a, p.327). Nous pensons à la suite de ces auteurs que **"la connaissance des notions de modèle et de modélisation [...] doit constituer un des objectifs de l'utilisation de la simulation dans l'enseignement"** (p.327). La simulation ne vise pas à donner simplement une représentation du modèle mais à donner du sens au modèle par représentation, *via* des objets de simulation, des phénomènes et/ou d'objets réels. Nous reprenons ainsi à notre compte l'hypothèse selon laquelle **"la simulation sur ordinateur peut être le support d'activités pertinentes sur les plans scientifique et pédagogique qui, renforçant la dimension conceptuelle de la modélisation, apparaissent d'emblée comme complémentaire de l'expérience"** (Durey et Beaufils, 1998, p.71). Il doit être explicite pour les élèves que les éléments du monde de la simulation sont des représentants sémiotiques des objets et événements du monde réel (ou d'une partie de ces objets) tandis que leur fonctionnement et les contraintes auxquelles ces entités sont soumises sont issues des deux modèles sous-jacents à la simulation (les modèles connus des élèves, pas ceux qui sont effectivement implémentés). Ce sont les règles des modèles qui sont appliquées à ces *objets de simulation*. Ainsi, cette double liaison du monde de la simulation, d'une part avec le monde des modèles d'autre part avec le monde des objets et des événements, permet de diminuer la distance entre les deux registres de savoirs habituellement considérés pour étudier l'activité de modélisation (hypothèse n°5 du chapitre IV) sans pour autant confondre ce qui relève des modèles et ce qui relève des

objets et des événements.

Un des apports majeurs de *simulaSON* pour favoriser l'activité de modélisation est la représentation animée d'objets de simulation, apparaissant **en tant qu'objets du monde de la simulation distincts des objets réels dont ils simulent le comportement**⁴⁶ (par exemple le trait vibrant à l'écran, simulant l'objet vibrant émetteur, est présenté comme tel). Autrement dit, nous avons fait le choix dans *simulaSON* de fournir sur l'écran des **représentations simulantes qui apparaissent explicitement avec un tel statut** et qui sont bien séparées les unes des autres (ceci reprend l'hypothèse n°6 du chapitre IV). Ces différentes façons (visuelles) de présenter l'information seront clairement distinguées de la perception sonore simultanée éventuelle.

X.3.2 Les modèles physiques adoptés

Nous détaillons ici les modèles physiques que *simulaSON* se propose de "faire vivre". Nous parlons ici des **modèles explicités pour les élèves**, qui ne produisent pas forcément les règles effectivement implémentées dans le logiciel, qui seront exposées un peu plus loin.

Comme nous l'avons déjà dit, les deux modèles constituant "l'ossature modélisante" de *simulaSON* sont le modèle de la vibration pour la création sonore et le modèle particulier de la propagation du son élaborés par le groupe SOC et exposé en détail dans la partie B. Nous détaillons ici les modifications qu'il a fallu apporter à ces modèles pour les mettre en accord avec les possibilités de simulation et les choix théoriques effectués.

Notons également que le modèle de la chaîne sonore doit être présenté avant toute activité menée avec *simulaSON*. La réception sonore par l'oreille est abordée au cours des tâches prévues. Les éléments de modèles concernant le principe de fonctionnement des microphones sont également intégrés au logiciel.

X3.2.1 Le modèle de la vibration pour la création sonore

Le modèle proposé avec *simulaSON* au sujet de la vibration est quasiment identique à celui que nous avons décrit dans la partie B (figure VI.4-1). La seule modification majeure réside dans la représentation adoptée pour illustrer l'amplitude. Alors que le modèle proposé par SOC utilisait un schéma de haut-parleur, la représentation adoptée ici est celle du monde de la simulation, pour bien la séparer du monde des objets et des événements. Le trait virtuel qui vibre a ainsi le statut d'objet vibrant "générique". La figure X.3-2 décrit ce modèle.

⁴⁶ Nous n'oublions pas cependant que certaines entités du monde de la simulation n'ont pas de référents directs dans le monde réel. C'est par exemple le cas des deux curseurs qui permettent de modifier la fréquence et l'amplitude.

Modèle de la vibration sonore pour la création sonore
Quand il y a une source sonore émettrice (l'objet ou la personne) qui produit le son, on appelle source ou une "voix" qui produit le son. Elle ou les sources sonores possèdent une ou des voix ou qu'elles. Une vibration est un mouvement régulier de va-et-vient d'un objet (ou mouvement d'oscillation). L'ampleur ou la vibration de la source est caractérisée par une fréquence et une amplitude. La fréquence est l'ampleur des oscillations. Définitions : — La fréquence de vibration est le nombre de vibrations qu'un objet ou un objet complet pour une seconde. Elle s'exprime en Hertz (Hz). — La période est le temps d'un cycle complet. Elle s'exprime en secondes. — Les mêmes notions s'appliquent à un objet ou à un objet complet, plus ou moins grand, de la même façon que les notions qui s'appliquent à un objet ou à un objet complet. L'ampleur de la vibration est la distance entre la position qu'elle a la source et la position de vibration possible (position qu'elle a ou qu'elle échange de sens (cf. schéma)).

figure X.3-2 : modèle de la vibration sonore pour *simulaSON*

X.3.2.2 Modèle particulier de la propagation du son

La littérature sur les modèles particuliers utilisés dans l'enseignement est maintenant relativement abondante (par exemple Méheut, 1996 ; Chomat et al., 1988 ; Chomat et al., 1992). Si les réflexions issues des recherches sur les modèles particuliers nous ont bien sûr inspirés pour l'élaboration de *simulaSON*, nous ne détaillons pas ces modèles dans la mesure où ils visent d'abord à fournir des interprétations de la structure de la matière, des concepts de pression, dilatation et compression, température ou encore des effets d'un milieu fluide donné sur des parois matérielles.

Ces travaux ont nécessité des recherches préalables sur les conceptions des élèves, consistant en particulier à attribuer des propriétés phénoménologiques aux particules, par transfert de comportement macroscopique de la matière considérée. Ainsi, les particules pourraient fondre, se dilater, se casser, se contracter, se colorier d'une certaine façon, etc. Sans avoir mené d'expériences à ce sujet nous donnons dans le tableau X.3-1 une synthèse de l'analyse *a priori* que nous avons faite à ce sujet, dans le cas du son. Nous pouvons d'une part rappeler les transferts éventuellement réalisés entre particule et milieu (gazeux pour ce qui concerne le tableau), d'autre part envisager les transferts possibles entre milieu ou particules et son. Certains transferts peuvent paraître "exotiques". Ceci est normal, nous avons cherché le maximum d'associations possibles *a priori*. Certaines conceptions décrites dans le chapitre III sont d'ailleurs cohérentes avec quelques-unes des possibilités que nous détaillons. Nous ne préjugeons pas forcément dans ce tableau du sens des liens possibles (sauf lorsqu'il est précisé explicitement). Notons enfin que quasiment tous ces transferts peuvent être faits potentiellement par les élèves avant enseignement (transferts assez proches du sens commun). Cependant, les transferts sur fond gris résulteraient plutôt d'une interprétation (plus ou moins valable) d'un modèle particulier de la propagation du son.

Tableau X.3-1 : transferts possibles *a priori* entre les trois entités particule, gaz et son (les transferts sur fond gris résulteraient plutôt d'une interprétation du modèle particulier de la propagation du son).

PARTICULE	GAZ (air par ex.)	SON
lourde	lourd	
légère <-----	-----	léger
incompressible ----->	incompressible	
bouge (vite)	bouge(vite)	bouge(vite)
	bouge	bouge
	est émis <-----	est émis
	ne rentre pas dans ce qui est dur ----->	ne rentre pas dans ce qui est dur
peut être un obstacle	peut être un obstacle	
localisée <-----	-----	localisé
reste dans un milieu donné		reste dans un milieu donné
vitesse élevée -----	----->	vitesse élevée
vibre ----->	Vibre	
reste globalement à la même place	----->	reste globalement à la même place

L'utilisation d'un modèle particulière pour comprendre la structure de la matière et ses modifications est explicitement mentionnée dans les textes officiels du collège (pas seulement en France). Ces modèles sont souvent accompagnés de simulation qui permettent d'introduire des aspects cinétiques et dynamiques et qui améliorent sensiblement la compréhension et l'utilisation des concepts en jeu. Les raisons qui ont motivé l'élaboration de ces simulations (invisibilité, phénomènes dynamiques, rapidité des phénomènes, difficultés pour donner du sens aux mesures en particulier) sont en partie les mêmes que celles que nous avons dégagées pour justifier la création de *simulaSON*.

Les modèles particuliers ont cette particularité de posséder une adaptabilité remarquable vis-à-vis des nouvelles théories construites par la physique et d'être utilisés dans de nombreux domaines scientifiques (Chomat et al., 1992). Nous exploitons ici cette richesse en élaborant un modèle particulière adapté à la description d'un mécanisme simplifié de la propagation du son. Nous avons bien conscience que ce modèle a un champ de validité relativement restreint. Il n'est pas utilisable en l'état pour une interprétation des notions de température ou même de pression sur une paroi. L'heuristique du modèle que nous proposons est donc bien plus limitée que celle des modèles classiques concernant la structure de la matière. Ces restrictions peuvent même, dans certains cas, induire ou renforcer des conceptions incorrectes identifiées chez les élèves (la confusion entre pression et densité, même si les concepts ne sont pas cités, peut par exemple être induite par la simulation que nous présentons). Il convient donc de bien préciser à l'élève que ce modèle, qui lui est donné sous forme papier, est d'abord un modèle de la propagation du son.

Le modèle adopté est présenté dans les annexes. Il comporte deux parties :

la première partie concerne les gaz en général. Elle s'apparente à un modèle classique

de sphères dures au sens où les chocs entre particules sont invoqués. Cependant, nous ne précisons pas que les sphères sont "dures" puisqu'elles pourront en partie se recouvrir mutuellement dans la simulation ;

la deuxième partie décrit en détail de façon qualitative ce qui se passe dans le milieu lorsque la source se met à vibrer. Les concepts *pression* et *densité* ne sont jamais utilisés, nous ne parlons que de zones plus ou moins comprimées ou dilatées. Cette partie reprend le modèle proposé par le groupe SOC. Nous y avons essentiellement ajouté les passages en italiques (voir annexes) qui décrivent les actions réciproques des ensembles de particules (appelés "tranches"). Cette partie est inspirée, en le simplifiant, d'un mécanisme de la propagation exposé dans l'ouvrage "Acoustique appliquée" de Couturie (1955).

Comme nous l'avons dit, la nature même de ce modèle écrit sur papier et fourni aux élèves ne permet que des représentations fixes. Il convenait alors d'implémenter des règles mathématiques pour faire vivre ce modèle de façon dynamique, en accord avec les valeurs de la fréquence et de l'amplitude choisies par l'utilisateur.

X.3.3 Implémentation des modèles : liens entre concepts et éléments du monde simulé

Nous explicitons ici les modèles théoriques effectivement implémentés pour permettre de proposer des images animées en accord avec les modèles écrits fournis aux élèves. Cette implémentation s'est faite sous de nombreuses contraintes, d'ordre à la fois théorique et pratique : choix sur le statut du monde de la simulation, choix au sujet des registres sémiotiques utilisés (voir plus loin), simplicité d'utilisation, contraintes purement graphiques, contraintes de rapidité de calcul et d'affichage permettant des modifications en temps réel.

Toutes ces contraintes font qu'il y a un décalage flagrant (du point de vue du physicien) entre les modèles mathématiques implémentés et les modèles (plus qualitatifs) fournis à l'élève. Ceci permet par contre d'assurer une cohérence forte entre ce qui est visible à l'écran et ce qui est décrit dans les modèles écrits.

X.3.3.1 Vibration et perception auditive

Le modèle à implémenter vise à donner du sens au concept physique de vibration et aux paramètres qui le caractérisent. La construction de ce sens nécessite l'établissement de liens entre paramètres physiques de la vibration et perception auditive. Ces liens faisaient explicitement partie du modèle de la vibration dans la progression SOC, même s'ils étaient induits par l'expérience. Nous ne les avons pas présentés ici car la simulation doit permettre de les construire (certaines tâches portent spécifiquement sur l'établissement de ces liens). L'implémentation a donc concerné d'une part la vibration simulée, d'autre part les liens avec les sons perçus.

L'élève peut à tout moment modifier les valeurs de la fréquence et de l'amplitude de la vibration simulée à l'aide de curseurs placés sur les axes d'un graphe (fréquence en

abscisse, amplitude en ordonnée).

La simulation permet alors :

de visualiser les effets des variations distinctes de la fréquence ou de l'amplitude du mouvement d'aller-retour d'une surface vibrante simulée (dont le représentant dans le monde de la simulation est un trait mobile). Ceci favorise les liens entre les concepts du modèle (vibration, fréquence, amplitude) et le mouvement d'aller-retour d'un émetteur sonore réel, même si les ordres de grandeurs sont très différents de ceux du monde de la simulation. Le trait vibrant est disposé de la même façon que sur le modèle écrit fourni aux élèves (trait vertical). Le mouvement est sinusoïdal puisque sa position est calculée à chaque instant selon l'expression $A \cdot \cos(2\pi f t)$ où A et f sont respectivement les valeurs de l'amplitude et de la fréquence choisies par l'utilisateur. Le comportement de ce trait simulé est donc bien en accord avec le modèle. Le mouvement est suffisamment lent pour être observé et les valeurs indiquées (pour fréquence et amplitude) sont les valeurs du monde de la simulation. Le lien entre modèle et monde de la simulation peut être appréhendé à moindre coût pour l'amplitude puisque la valeur de l'amplitude est indiquée et représentée en centimètres. Il est moins immédiat pour la fréquence. Cependant la période peut être mesurée grâce à un chronomètre inclus au logiciel. Ces relations sont notées (1) sur la figure X.3-3, tandis que les relations entre la vibration du monde de la simulation et le mouvement d'aller-retour réel sont notées (1) ;

de lier le comportement de la "surface" vibrante simulée avec le son créé par une surface réelle dont la vibration posséderait des caractéristiques (fréquence et amplitude) d'une autre échelle (mais liées aux valeurs de la simulation) : en ce sens le monde de la simulation simule bien les objets et les événements. Le lien, explicité, est purement qualitatif pour l'amplitude (pour diverses raisons, pas seulement techniques, voir plus loin) : l'intensité sonore augmente (ou diminue) lorsque l'amplitude est augmentée (ou diminuée) par l'utilisateur. Le lien fréquentiel est semi-quantitatif puisque la fréquence du son perçu est, à chaque instant, 1000 fois plus grande que la fréquence du mouvement observé (le pas de la fréquence sonore est de 50 Hz). Ces relations sont notées (2) sur la figure X.3-3.

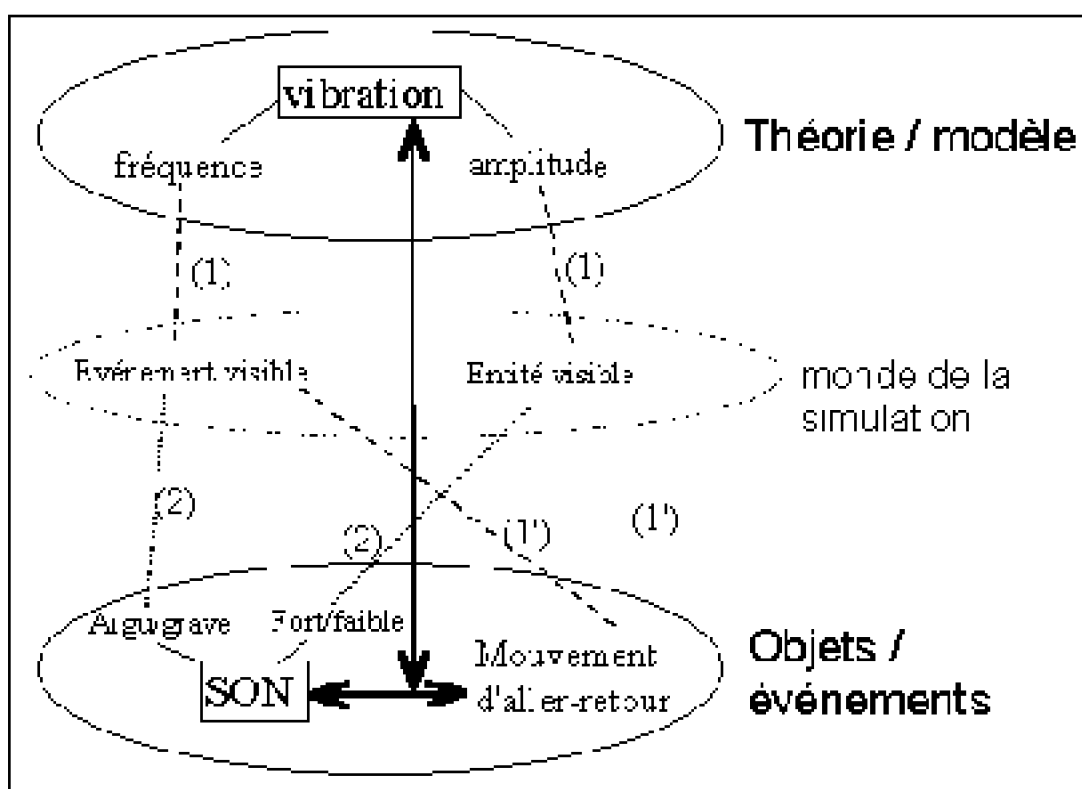


figure X.3-3 : passage par le monde de la simulation dans la construction du concept de vibration en relation avec la perception sonore

La figure ci-dessus est à comparer à la figure VI.4-3 qui décrit les mêmes relations mais sans le monde de la simulation. Cette représentation permet de voir en quoi le monde de la simulation peut avoir un rôle facilitateur dans l'établissement de ces liens.

X.3.3.2 Propagation

La propagation du son peut être décrite par deux modèles bien différents :

un **modèle particulier** : il permet de comprendre comment l'information vibratoire se propage, de modéliser certains types d'interaction avec la matière et de visualiser ce qui se propage ; il permet également de donner une représentation graphique explicite de la longueur d'onde : c'est ce type de modèle qui est **fourni aux élèves** ;

un **modèle ondulatoire**, prenant généralement une forme mathématique : il permet de donner du sens à la dépendance spatio-temporelle, d'avoir une vision de la propagation en terme de champ propagatif, d'étudier les réflexions et les conditions aux limites par exemple : c'est le modèle classique du physicien, celui qui est **implémenté** dans les animations que nous avons mentionnées au sujet des ondes et dans *simulaSON*.

Ce qui est implémenté dans *simulaSON* relève plutôt du deuxième modèle (ondulatoire) alors que ce qui est représenté correspond davantage à ce qui est représenté dans le

premier modèle (particulaire). Ce décalage est essentiellement dû à des contraintes techniques : il est illusoire de vouloir générer la propagation d'une vibration avec l'implémentation d'un modèle d'interaction entre plusieurs centaines de particules. La limitation de la puissance de calcul ajoutée au nécessaire affichage à l'écran rend l'entreprise impossible. L'outil informatique permet en fait d'avoir un rendu global du comportement des molécules sans être obligé d'utiliser les lois d'interaction entre les particules. Ce qui est implémenté n'est que le mouvement de chaque rangée verticale de particule par une équation du type

$$A \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \left(t - \frac{x}{v}\right)\right)$$

où x est la position de cette rangée dans le tuyau (la phase dépend de la positions des particules). Pour donner un effet d'agitation, à chaque calcul de nouvelle position, l'image de chacune des rangées est choisie au hasard parmi une vingtaine d'images différentes possibles, dont nous donnons deux exemples sur la figure X.3-4 ci-dessous.

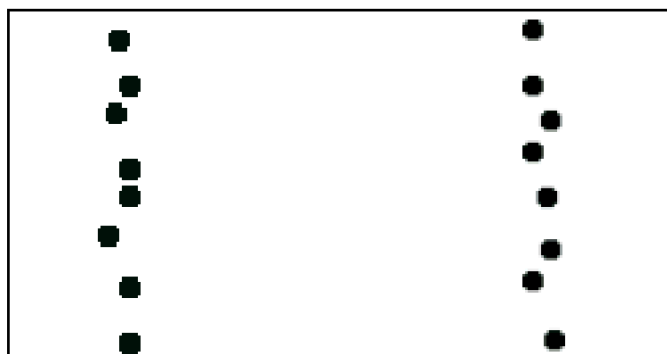


Figure X.3-4 : deux exemples de rangées de particules affichées aléatoirement une fois la position calculée

Nous avons donc choisi de *simuler* le comportement des particules, lorsqu'il y a vibration de la source, en implémentant ce que le physicien sait être le *résultat* de ces interactions. En ce sens, ce n'est pas le modèle particulaire qui est implémenté mais le résultat plus général et quantitatif constitué par la formule générale d'une onde plane progressive et harmonique.

Les particules apparaissent bien en tant que particules simulées : on peut mener sur ces particules des actions qu'on ne pourrait pas mener sur des particules réelles, comme les colorier pour suivre leur mouvement spécifique. On peut, à partir de cet ensemble de particules, observer simultanément le comportement de l'ensemble (propagation de zones de compression), d'une de ces particules (vibration à la même fréquence que celle de la source), ou d'une tranche (alternance des états comprimés et dilatés). La relation que la longueur d'onde entretient avec période et vitesse du son est une difficulté que la présente simulation souhaiterait rendre moins importante. Les grandeurs du modèle "vitesse" et "longueur d'onde" sont donc également disponibles à chaque instant (en plus de *fréquence*, *période* et *amplitude*). Ces grandeurs sont calculées grâce au modèle

implémenté. Toutes les valeurs affichées (fréquence, amplitude, vitesse, longueur d'onde) sont les valeurs correspondant à la vibration et à l'onde visualisées à l'écran.

X.3.4 Type de simulation adoptée

Nous avons vu que les modèles peuvent vivre à travers la simulation en utilisant, pour l'implémentation, d'autres modèles qui ne sont pas fournis à l'élève. Ceci pose le problème plus général de la nature de la simulation que nous proposons avec *simulaSON*.

X.3.4.1 Comparaison par rapport à la pratique de référence

Nous nous posons ici la question de l'écart entre l'épistémologie de la présente simulation et celles traditionnellement sous-jacentes aux simulations utilisées par le physicien.

Nous pouvons ainsi rechercher les invariants dans le processus de transposition à ce sujet (Beaufils et al., 1996). D'abord, comme pour le physicien, cette simulation concerne (et est mis en place pour cette raison) des situations "non reproductibles en laboratoire" (Beaufils et al., 1996). De plus, l'objectif est bien ici d'observer l'évolution d'un système à partir des règles théoriques qui régissent le fonctionnement de ce système (simulateur de vol, prévisions météorologiques...). L'heuristique reste importante dans un cas comme dans l'autre. Par contre, la nature de la présente simulation diffère largement de celle des simulations que le physicien utilise, du fait même des objectifs fixés. Le physicien simule pour obtenir des informations qu'il n'est pas capable d'obtenir par d'autres procédures (le calcul formel par exemple). Ici, la stratégie est didactique : nous pouvons alors nous permettre d'implémenter des règles théoriques très proches du résultat *connu* (par le physicien) à présenter graphiquement pour l'élève. **Il ne s'agit plus d'une investigation sur ce qui est généré par des règles élémentaires d'un modèle, comme en physique, mais d'une animation d'un modèle fourni à l'élève.** C'est là une différence fondamentale avec la pratique de référence.

Cependant, pour l'élève, l'utilisation de la simulation peut également être exploratoire. Il n'est pas forcément capable d'imaginer ce que génère dans le temps et dans l'espace les règles des modèles écrits qui lui ont été fournis

Notons enfin qu'il est également possible de repérer une similitude avec les simulations du physicien dans le fait que *simulaSON* permet de dégager les limites de fonctionnement du modèle. *SimulaSON* met en oeuvre des simulations qui rendent compte d'une petite partie seulement (la plus fondamentale cependant du point de vue de la physique) de l'ensemble des phénomènes sonores. Ceci nous paraît important pour permettre une première réflexion sur le statut d'un modèle. Les propos de Beaufils et al. (1987a) à ce sujet nous semblent assez éclairants :

"Dans certains cas il s'agira moins de faire "coller" la simulation avec la réalité que de bien faire comprendre ce qu'est un modèle et comment la simulation peut permettre à la fois de valider un modèle et d'en définir les limites. De façon générale la connaissance des notions de modèle et de modélisation qui sont ainsi mises au premier plan, doit constituer un des objectifs de l'utilisation de la simulation dans l'enseignement."(p.327).

X.3.4.2 Nature de la simulation : simulation ou représentation de résultats ?

Nous avons vu que l'écart entre ce qui est implémenté et ce qui est présenté à l'élève comme modèle "animé" par la simulation nous a fait mettre en question la nature effective du logiciel que nous proposons. Du point de vue de Beaufils et al (1987b), notre logiciel tend davantage vers la représentation de résultats que vers la simulation puisqu'ils estiment, en référence à la pratique du physicien, que pour qu'il y ait simulation, il faut que l'élève connaisse la façon dont est implémenté le modèle, ce qui n'est pas le cas pour *simulaSON*.

Sans négliger cette particularité de *simulaSON*, nous continuons cependant à considérer que notre logiciel propose des simulations. Les objectifs et actions permises par *simulaSON* sont en effet en accord avec ce que Grémy (1985), par exemple, dit de la simulation : c'est pour lui une procédure de recherche scientifique qui consiste à réaliser une reproduction artificielle (le modèle) du phénomène que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsque l'on fait varier les actions que l'on peut exercer sur celle-ci, et à en induire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence d'actions analogues.

Cette dernière phase de retour au monde des objets et des événements est loin d'être la plus facile et il faut y porter une attention particulière (voir plus loin).

Nous estimons également que *simulaSON* permet de mener les trois activités citées par Grémy, l'aide à la recherche, la prévision et la familiarisation avec la réalité, mais également l'exploration, l'application et la manipulation des modèles, citées par Martinand (1987, p.42).

Blanchet (1987) définit la simulation comme une manière de représenter un modèle dans un univers symbolique, ce qui correspond parfaitement à *simulaSON*. Toutes ces caractéristiques nous permettent de penser raisonnablement que nous proposons un logiciel de simulation. Nous pouvons même préciser le type de simulation en jeu. Beaufils et al. (1987a, 1987b) distinguent les logiciels qui simulent un appareillage de ceux qui simulent un phénomène. *SimulaSON* appartient bien évidemment à la deuxième catégorie. La façon dont ils caractérisent ce type de logiciel nous paraît être un bon résumé du principe de fonctionnement de *simulaSON* :

"Dans ce cas le logiciel fait référence à un modèle mathématique d'un phénomène physique. Le noyau du logiciel est alors constitué de la procédure qui exécute les calculs, et l'interactivité se situe au moment de la donnée des valeurs de ce que nous appellerons dans la suite "variables de choix du logiciel", c'est-à-dire des variables d'entrées et/ou les paramètres du modèle" (Beaufils et al., 1987a, p.324).

Ces auteurs précisent également que ***"ce type de simulation comportementale"⁴⁷ ne prend en fait tout son sens que si les équations sont trop complexes pour qu'une solution analytique soit accessible aux élèves***, ce qui est également le cas ici, même si les équations ne sont ici même pas connues des élèves.

⁴⁷ c'est nous qui soulignons.

X.4 Hypothèses sur les représentations sémiotiques

X.4.1 Hypothèses

Il est bien évident que les "manipulations" des concepts permises par *simulaSON*, les appariements entre éléments du monde de la simulation et objets réels nécessitent la désignation (et par seulement grâce au langage naturel) des objets (simulés ou non) et des concepts. Se pose alors la question de la représentation des objets et des concepts en jeu, qui est une tâche décisive dans la modélisation (Martinand, 19XX).

Si la représentation figurale ou schématique peut désigner des *objets* impliqués dans une expérience, le problème est plus délicat lorsqu'il s'agit de donner du sens à des *concepts* ou phénomènes via des représentations. Si, comme Duval, ***"on définit généralement la représentation de la même manière que l'on définit le signe linguistique, c'est-à-dire comme une relation entre quelque chose (forme, trace, objet...) visuellement ou auditivement appréhendé et l'évocation d'autre chose qui est absent ou dont la représentation est simplement "mentale" "*** (Duval, 1995, p. 62), alors les sons perçus permettent la représentation, par association avec une image mentale (qui peut être visuelle) ou une sensation.

Dans les choix à effectuer quant aux activités cognitives induites par l'utilisation de *simulaSON*, nous devons alors prendre en compte quelques hypothèses au sujet des représentations externes et issues de travaux portant spécifiquement sur le sujet (Ainsworth et al., 1996 ; Duval, 1995) :

Un même concept pourra être représenté de manières différentes, chaque représentation apportant une information spécifique à son sujet (voir dans notre cas les tableaux X.4-2 et X.4-3 dans le paragraphe suivant). C'est la compréhension de l'ensemble des représentations qui permet de donner du sens au concept.

Nous considérons à la suite de Duval (1995) que ***"l'activité conceptuelle implique la coordination des registres sémiotiques"***, en particulier des différents types de représentations. Il faut également ***"être parvenu au stade de la coordination de représentations sémiotiquement hétérogènes" pour pouvoir "discriminer le représentant et le représenté, ou la représentation et le contenu conceptuel que cette représentation exprime, instancie ou illustre "***. Ce que Duval appelle le degré de liberté des représentations sémiotiques, à savoir le fait qu'elles ***"peuvent être appréhendées soit uniquement sous l'aspect du représentant, soit uniquement sous celui de ce qu'il représente", semble "essentiel pour qu'il y ait compréhension conceptuelle ou possibilité d'un traitement formel des représentations sémiotiques d'un objet"*** (Duval, 1995, p.68). Toute représentation devra être présentée comme une représentation exprimant des concepts (ou certaines facettes de ces concepts).

A condition que la signification de chaque représentation soit bien repérée, le passage d'une représentation à une autre permet alors de construire du sens et doit donc être favorisé pour pouvoir atteindre la coordination mentionnée ci-dessus et l'objectivation des représentations. Se contenter de proposer des représentations multiples sans mener d'activité visant à établir des liens entre ces représentations pourraient être dangereux. Nous reprenons là encore à notre compte une hypothèse de Duval (1995) : **"Le changement de registre constitue une variable cognitive qui se révèle fondamentale en didactique : elle facilite considérablement l'apprentissage ou elle offre des procédures d'interprétation"** (p. 59). **"Un sujet chez lequel la coordination des registres s'est trouvée suffisamment développée peut très bien s'en tenir aux représentations d'un seul registre. De son point de vue la relation directe entre représentant et représenté est suffisante"** (p. 69). Par contre, dans une phase d'apprentissage, la relation entre représentant et représenté peut nécessiter la relation entre le concept ou objet cognitif visé et la relation de convertibilité entre deux représentants. Nous avons donc veillé à bien délimiter les représentations et à contraindre les liens qui peuvent exister entre elles. Ainsi, certaines tâches (celles que nous avons dénommées "sémiotiques") ont pour objectif d'assurer la compréhension des liens entre deux représentations données.

Enfin, étudions le cas (courant dans des situations d'apprentissage en physique) où l'on n'a pas d'accès direct perceptif aux objets en jeu. Comme le dit Duval, **"faire effectuer cette discrimination [entre représentant et représenté] semble très facile lorsque le représenté est un objet qui peut être montré en dehors de toute représentation, comme c'est le cas pour ce qui révèle d'une expérience perceptive dans laquelle l'objet peut être vu, montré du doigt, touché et manipulé. Mais la situation change lorsqu'il n'y a pas d'accès intuitif direct à l'objet lui-même. Comment alors favoriser cette différenciation et faire ainsi accéder à ce degré de liberté vis-à-vis de représentations sémiotiques ?"** (pp. 68-69). Pour les deux fenêtres qui utilisent des figures, ou tout au moins des représentations analogiques (*Vibratoire* et *Microscopique*), il semble bien que, sans rendre les objets réels, elles tendent à donner une existence concrète à ces objets : un trait fictif et mobile représente la surface vibrante de la source, des points noirs en mouvement représentent les constituants du milieu, un "tuyau sonore" est figuré. D'autre part, les actions sur ces objets sont aussi celles qu'on pourrait imaginer faire sur des objets réels : les stopper (prendre une photo), les designer, voire les colorier. Ces représentants d'objets réels sont donc probablement plus proches de *maquettes* que de représentations sémiotiques puisque le représentant et le représenté ont des caractéristiques phénoménologiques fondamentales très proches. Comme l'indique Duval (p.66), le mode particulier de traitement de la maquette est la simulation. Nous estimons que la simulation peut ensuite permettre l'objectivation.

X.4.2 Présentation des différentes fenêtres et représentations

Après la description de ces hypothèses, il ne faut pas s'étonner de voir dans *simulaSON*

des **représentations qui sont volontairement bien séparées dans des fenêtres bien distinctes** (disposition sur l'écran, couleur liée à chaque fenêtre...). Quand cela est possible, **la modification d'une représentation entraîne des modifications pour les autres**.

Chaque fenêtre (sauf le graphe) est appelée par l'utilisateur grâce à un bouton. Pour limiter l'influence d'un registre supplémentaire, ces boutons ne sont pas iconiques mais décrivent l'action effectuée si on clique dessus. Le tableau X.4-1 décrit le contenu des différentes fenêtres :

Tableau X.4-1 : description du contenu des différentes fenêtres

⁴⁸ Nous ne discuterons pas ici du caractère de registre sémiotique des sons. Nous pouvons cependant considérer que les sons permettent la représentation (par association éventuelle avec des représentations mentales).

Fenêtre	registre sémiotique	Objets et concepts représentés	Actions possibles	Couleur associée
Graphique	Graphe (non analogique)	- fréquence (abscisse) - amplitude (ordonnées)	modifiable	Rouge
Numérique (paramètres de la vibration)	expression algébrique + unité (non analogique)	- fréquence (Hz) + période (s) - amplitude (en cm)	aucune	Jaune
Sonore (écouter)	"son" ⁴⁸	- perception auditive (aigu/grave ; fort/faible)	aucune	Vert
Vibration	schéma (analogique)	- trait vertical en mouvement - amplitude (trait vertical fin) + fréquence de déplacement	pause, animation	Bleu
Microscopique	Schéma (analogique)	- source simulée (reprise de « vibration ») - « particules » + « particules particulières »	pause, animation, pas-à-pas	Gris
Capteurs/écran	graphe (non analogique)	2 courbes (avec forme, amplitude et fréquence) liées à un objet du modèle microscopique.	Déplacement des capteurs.	Noir

Enfin, nous donnons ci-dessous un exemple de la répartition des différentes "facettes" d'un même concept (du point de vue du physicien) selon les représentations qui les supportent, puisque chaque représentation apporte des informations spécifiques. L'analyse des concepts fréquence et amplitude (tableau X.4-2) nous paraît la plus intéressante (car simulaSON utilisent de nombreuses facettes).

Tableau X.4-2 : Facettes des concepts *fréquence* et *amplitude* et registres associés

⁴⁸ Nous ne discuterons pas ici du caractère de registre sémiotique des sons. Nous pouvons cependant considérer que les sons permettent la représentation (par association éventuelle avec des représentations mentales).

facettes de « fréquence »	facettes d' « amplitude »	Fenêtre et représentation associées
grandeur qu'on peut faire évoluer qualitativement sur un axe	grandeur qu'on peut faire évoluer qualitativement sur un axe	graphe
grandeur physique avec valeur et unité	grandeur physique avec valeur et unité	valeurs numériques (+ unités)
"rapidité" du vibreur (non matérialisée, à observer)	moitié de la distance parcourue par le vibreur pendant un aller (ou un retour)	<i>Représentations animées</i> – vibration - microscopique
concept pouvant être défini en langage naturel	concept pouvant être défini en langage naturel	Langage naturel

Nous donnons également l'analyse, moins riche, pour les concepts *vibration* et *propagation* (tableau X.4-3).

Tableau X.4-3 : Facettes des concepts *vibration* et *propagation* et registres associés

facettes de « vibration »	Fenêtre et représentation associées
Aller-retour régulier	- vibration
Phénomène qui peut être caractérisé par des grandeurs physiques	- graphe - valeurs numériques (+ unité)
Aller-retour forcé d'une particule dans le milieu	- microscopique
Moyen de décrire/interpréter une courbe alternative	- capteurs et écran
facettes de « propagation »	registre associé
Mode de transport d'une information événementielle sans déplacement de matière	- microscopique
Phénomène ayant une vitesse	- microscopique

X.5 Description de *simulaSON*

X.5.1 Type d'environnement et organigramme des fenêtres

SimulaSON fournit différentes représentations de sons purs pour lesquels fréquence et amplitude peuvent changer. L'utilisation consiste à faire des liens (et à en avoir conscience) entre certaines de ces différentes représentations, qui sont explicitement séparées dans des fenêtres différentes. Celles-ci sont appelées séparément, sont séparées spatialement sur l'écran et ont chacune une couleur de référence. La seule fenêtre permanente est un graphe représentant la fréquence en abscisse et l'amplitude en ordonnée (ce choix peut paraître arbitraire mais permet d'être en accord avec la représentation conventionnelle d'un spectre). Les "variables de choix" du modèle, *fréquence* et *amplitude*, peuvent être modifiées seulement à partir de cette "fenêtre" qui est donc la "console de contrôle" des paramètres. Autour sont présents différents boutons

sur lesquels on peut cliquer pour observer telle ou telle fenêtre et donc représentation. Les couleurs de ces boutons sont les couleurs de fonds des fenêtres ou des informations correspondantes. Trois fenêtres concernent la vibration observable ainsi que la simulation microscopique. Le bouton "écouter" permet bien sûr d'écouter le son correspondant (variation qualitative de fréquence et amplitude). La figure X.5-1 donne un exemple d'écran, sur lequel sont activées toutes les fenêtres (sauf "capteurs et écran").

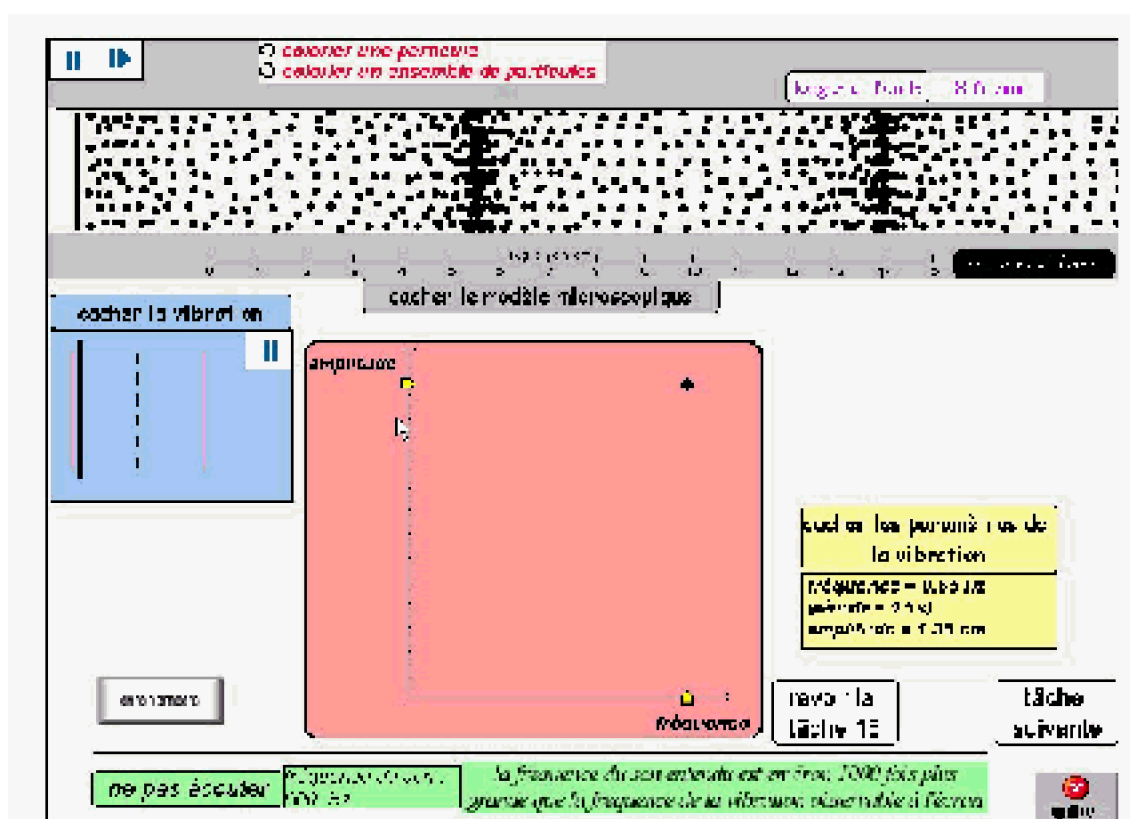


figure X.5-1 : Exemple d'écran de simulaSON (version "utilisation libre")

Certains liens entre ces représentations apparaissent explicitement à l'écran. C'est le cas pour la simulation microscopique et la vibration puisque le mouvement du trait vibrant à l'écran est exactement le même que le mouvement du trait source dans le tuyau sonore simulé. Par ailleurs, la fenêtre "capteurs et écran" peut être ouverte lorsque la représentation microscopique est à l'écran. Les liens explicites entre les différentes fenêtres sont schématisés sur la figure X.5-2:

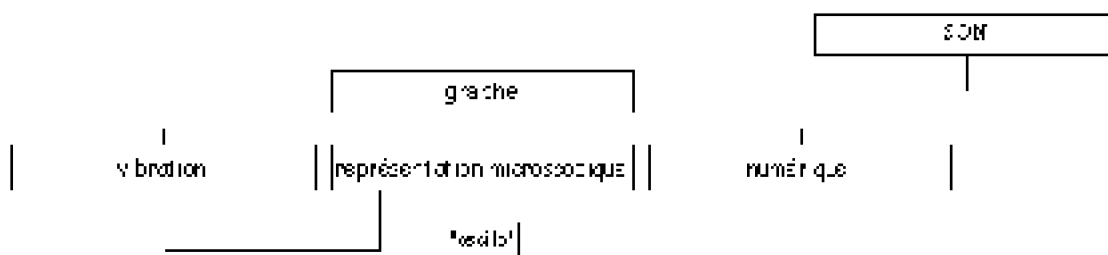


figure X.5-2 : organigramme et liens explicites entre les fenêtres

X.5.2 Signification des objets manipulés et actions possibles

X.5.2.1 Fenêtre "graphe"

La représentation "graphe" est la seule présente en permanence. L'utilisateur peut modifier graphiquement la valeur de l'amplitude ou de la fréquence. Le point de coordonnées donne alors une représentation qualitative du couple de valeurs qui va déterminer la vibration observable (et éventuellement le son entendu correspondant, à des facteurs d'échelle près). Lors de la modification d'une grandeur, les autres représentations (y compris le son) sont **modifiées en temps réel**. Puisque les significations des concepts *fréquence* et *amplitude* sont à construire, il est indispensable de ne pouvoir modifier qu'une des deux grandeurs à la fois. Il est actuellement impossible d'avoir deux points sur le graphe.

Il n'y a pas d'échelles indiquées sur les axes. Ce sont en effet davantage les variations quantitatives qui importent dans la manipulation de cette représentation que les valeurs en elles-mêmes, affichées par ailleurs (fenêtre "paramètres"). De plus, pour la fréquence, l'axe n'est pas gradué car la valeur de celle-ci dépend de l'ordinateur sur lequel on exécute l'application (le processeur fixe l'intervalle de fréquences "observables")⁴⁹. Pour l'amplitude, la graduation est suggérée, elle correspond à l'amplitude affichée en centimètre.

X.5.2.2 Fenêtre "paramètres"

Cette représentation indique les valeurs en cours de la fréquence et de l'amplitude. Nous avons ajouté la période juste sous la fréquence pour permettre de discuter éventuellement le lien entre les deux grandeurs mais surtout pour permettre une vérification quantitative (en chronométrant) de l'effet d'une augmentation de fréquence. La période est en effet mesurable relativement facilement alors qu'un calcul de fréquence est moins direct (cependant il ne doit pas être à négliger) puisqu'il nécessite un calcul (il est plus facile de compter le temps mis pour faire 10 aller-retours, par exemple 12,2 s, que de d'estimer qu'en 10 secondes, on a eu 8,2 aller-retours). Les valeurs sont celles de la vibration simulée (dans les fenêtres "vibration" et "microscopique").

⁴⁹ L'intervalle des fréquences de la vibration observable à l'écran dépend du processeur. Plus il est performant plus cet intervalle est décalé vers le haut. On donne à titre indicatif les fréquences maximales pour quelques exemples : 233 MHz : 1,1 Hz ; 300 MHz : 1,2 Hz ; 400 MHz : 1,5 Hz.

La fréquence est indiquée en Hertz, avec deux décimales. L'amplitude est indiquée en centimètres pour utiliser une unité commune et correspondant à l'ordre de grandeur des **amplitudes visualisées**. L'amplitude peut varier de 0 à 1,49 cm⁵⁰.

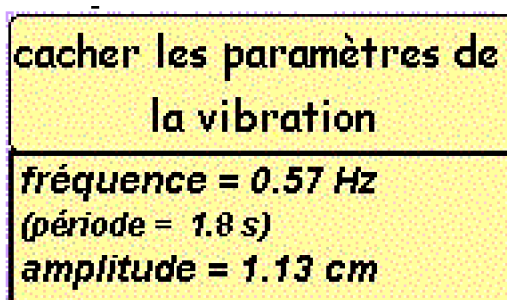


figure X.5-3 : fenêtre "paramètres" ouverte

X.5.2.3 Fenêtre "écouter"

Cette représentation de la vibration n'est pas figurale mais sonore. En cliquant sur "écouter", on entend un son pur dont la fréquence est environ 1000 fois plus grande que la fréquence de la vibration qu'on peut observer à l'écran. Pour qu'il n'y ait aucune ambiguïté entre les deux fréquences impliquées, leur relation est mentionnée en toutes lettres dès que la fonction "écouter" est activée. La fréquence du son entendu est indiquée en Hertz.

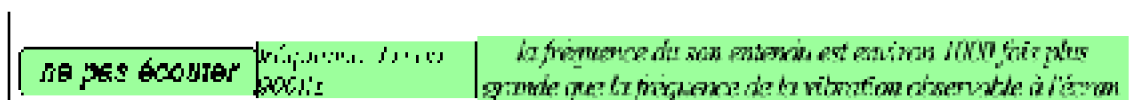


figure X.5-4 : fenêtre "écouter" ouverte

Dans l'état actuel du développement, elle ne peut évoluer que de 50 Hz en 50 Hz. Ainsi, si la fréquence de la vibration est comprise entre 1,20 et 1,25 Hz, celle du son entendu sera de 1200 Hz. Elle passera à 1250 Hz quand celle de la vibration sera supérieure à 1,25 Hz (et inférieure à 1,30 Hz). L'amplitude n'est par contre ni indiquée ni définitivement réglée. Il y a plusieurs obstacles à ceci :

Le niveau dépend du réglage du niveau sonore de l'ordinateur utilisé (le logiciel règle le volume du son joué à un niveau qui permet normalement de jouer n'importe quel son avec un niveau acoustique supportable). Le niveau acoustique est donc relatif et seule la variation d'amplitude sera significative.

Le niveau acoustique perçu dépend du matériel utilisé (bandes passantes des haut-parleurs, position par rapport aux haut-parleurs...).

⁵⁰ L'animation peut être lue sur un écran configuré en 800 X 600 ; elle sera alors vue en plein écran. Dans ces conditions, et dans l'état actuel du développement, l'unité de longueur (le cm) ne sera probablement pas respectée. Il est donc conseillé d'avoir un écran configuré en 1024 X 768. L'unité de longueur est respectée, plus ou moins précisément, pour des écrans de l'ordre de 15 pouces.

La variation logarithmique de la perception en fonction de l'amplitude ne pouvait pas ici être rendue. Ceci aurait obligé à effectuer de nombreux changements d'échelle à l'écran, ce que nous souhaitions éviter pour pouvoir comparer les différentes amplitudes par simple observation (et non par lecture d'échelle).

En conséquence, on n'accordera pas aux variations d'intensité plus de signification qu'elles n'en ont. L'essentiel ici est surtout d'illustrer que "c'est plus fort" quand l'amplitude augmente. Il est possible alors de mentionner que les émetteurs sonores vibrent avec des amplitudes qui sont d'un autre ordre de grandeur.

X.5.2.4 Fenêtre "vibration"

Cette fenêtre présente une des deux représentations animées de *simulaSON*. Le trait noir a un mouvement linéaire sinusoïdal entre les deux barres rouges (qui permettent de repérer l'amplitude). La position du trait sans vibration (à l'équilibre) est représentée par le pointillé noir. Les effets des modifications de paramètres sont très différents selon qu'il s'agit de l'amplitude ou de la fréquence.

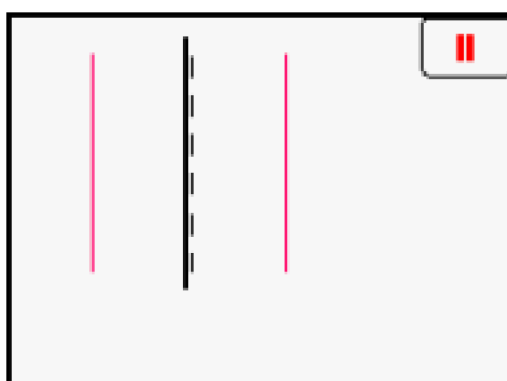


figure X.5-5 : fenêtre "vibration"

Pour l'amplitude, la conséquence d'une modification est bien sûr observable quasi immédiatement puisqu'elle se traduit par un déplacement des deux barres rouges. Pour la fréquence, on constate bien sûr en augmentant la fréquence que le trait "va plus vite" (le problème pour l'apprentissage est que c'est aussi le cas si on augmente l'amplitude sans changer la fréquence, au sens où la vitesse du trait augmente). Même si la fréquence dépend des performances du processeur utilisé, la valeur numérique indiquée dans les paramètres est toujours correcte (à quelques centièmes de Hertz près). Lors des modifications des valeurs, les changements sont effectués en temps réel, ce qui peut donner, dans le cas de la fréquence, des mouvements temporairement irréguliers de la surface simulée.

X.5.2.5 Fenêtre "microscopique" ou particulière

Cette fenêtre "microscopique" est celle qui renferme le plus d'informations.

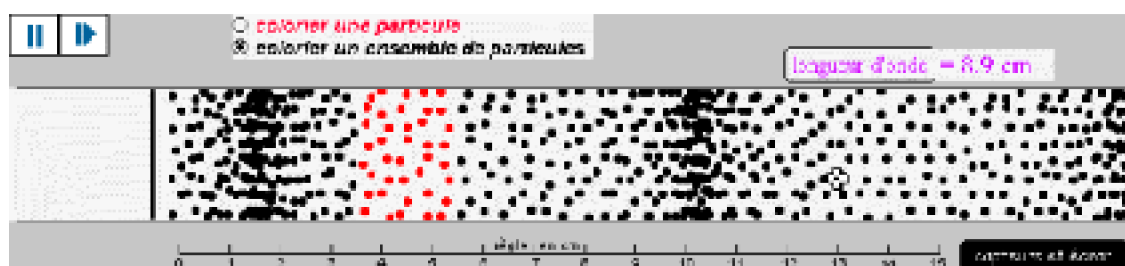


figure X.5-6 : fenêtre "microscopique"

Nous réservons le terme de "représentation microscopique" à ce qui est représenté dans la bande plus claire (tuyau sonore simulé). Lors de l'apprentissage, elle doit être utilisée après les autres représentations, une fois effectué un travail sur la relation entre sensation perceptive et vibration.

On peut distinguer dans cette fenêtre des objets graphiques de natures différentes :

Objets simulés

—
"tuyau sonore" : c'est la zone claire comprise entre deux traits fins horizontaux. Même si la taille limitée de l'écran implique bien sûr de ne représenter qu'une partie de ce tuyau, c'est bien un tuyau sans extrémité qui est simulé (tuyau infini). Ceci permet d'éviter la prise en compte de réflexions éventuelles et par suite de phénomènes de résonance et d'ondes stationnaires.

—
surface vibrante simulée par un trait noir : ce trait a rigoureusement le même mouvement que le trait de la représentation "vibration".

—
particules simulées par des petits cercles noirs en mouvement. On insiste ici sur le choix du terme "particules". Ces disques noirs ne sont en effet en aucun cas les représentants des molécules du gaz. Ils correspondent davantage à la notion de **particules fluides** utilisée en mécanique des fluides (portion de fluide petite à l'échelle macroscopique et grande à l'échelle microscopique). Nous sommes ici, du point de vue de la physique, au niveau mésoscopique. Cette nuance étant cependant inaccessible aux élèves, nous conservons le terme "microscopique" auquel nous préférons cependant "particulaire".

Boutons de contrôle de l'interface et outils d'observation ;

—
les boutons , et





permettent de contrôler l'animation en réalisant respectivement l'animation, la pause ou la visualisation image par image.

les boutons de **visualisation de particules** facilitent l'observation du mouvement de certaines particules choisies par l'utilisateur. Ceci nous paraît très utile car l'un des avantages de cette animation est de pouvoir voir à la fois le déplacement d'une perturbation dans le "tuyau sonore" et le mouvement des particules prises individuellement. On peut ainsi constater que c'est la somme des mouvements particuliers qui permet d'avoir un mouvement d'ensemble bien différent : les particules vibrent autour d'une position moyenne avec des propriétés vibratoires fidèles à celles de la source alors que les zones de grande et faible densité se propagent de proche en proche. Cependant, il n'est pas forcément évident de suivre à l'oeil nu le mouvement d'une particule en particulier. On pourrait dans un premier temps avoir l'impression qu'elles vont de gauche à droite. C'est pour aller contre cette impression que l'on peut colorier certaines particules et ainsi faciliter l'observation de leur mouvement. Il faut pour ceci cocher le bouton "colorier une particule" puis cliquer dans le tuyau sonore sur la zone où l'on souhaite colorier une particule. Ceci ne désactive pas les fonctions de contrôle de l'animation. On peut colorier plusieurs particules individuelles. On peut aussi colorier une "tranche" de particules en cochant le bouton "colorier un ensemble de particules". Ceci permet d'observer l'alternance des états comprimé et dilaté d'une tranche donnée.

les boutons indiquant la **phase** du milieu permettent d'observer la modélisation de la propagation dans un gaz ou dans un solide. L'amplitude et la fréquence sont conservées quand on passe d'un milieu à l'autre mais il n'y a pas conservation de l'échelle puisque la densité des particules reste identique. Ce n'est pas le même milieu qui change de phase. Le but est seulement de donner une représentation de l'ordre qui règne dans un solide, en comparaison du désordre et de l'agitation des particules d'un gaz.

le bouton **vitesse** permet de lire la vitesse de propagation de la perturbation. Elle est exprimée en cm.s^{-1} afin d'assurer la cohérence avec l'unité de distance choisie. On peut éventuellement vérifier sa valeur à l'aide du chronomètre et de la règle graduée représentée. La simulation utilisée est compatible avec l'indépendance entre vitesse et amplitude, ainsi qu'entre vitesse et fréquence.

le bouton **longueur d'onde** permet de lire la valeur de la longueur d'onde. La valeur évolue dynamiquement au fur et à mesure des modifications de fréquence. La règle

située sous le tuyau sonore permet de contrôler approximativement cette valeur, en particulier en faisant un arrêt sur image. Pour des fréquences trop faibles, la longueur d'onde dépasse largement les dimensions du tuyau sonore.

X.5.2.6 Fenêtre "capteurs et écran"

Cette fenêtre est fortement liée à la représentation particulière puisqu'elle ne peut être visualisée qu'à partir de celle-ci, en cliquant sur le bouton "capteurs et écran". Il apparaît alors dans la fenêtre "microscopique" deux disques, un bleu et un vert, une bande étroite dans laquelle sont situés ces deux disques, et l'écran noir simulant celui de l'oscilloscope (sur la figure X.5-7 un capteur est gris, l'autre blanc).

Bien que ces deux disques soient les représentants des microphones dans l'expérience réelle, qui doit être disponible lorsque l'élève utilise cette représentation, nous choisissons ici de les appeler des capteurs. Nous nous interdisons en effet de mélanger sur une même représentation des éléments du modèle et des objets réels (même s'ils ne sont que représentés). C'est également pour cette raison que ces "capteurs" n'ont pas l'aspect de micros. Le point commun entre capteurs et micros réside dans leur fonction : ils rendent compte de l'état du milieu à l'endroit où ils sont situés, et ceci à chaque instant. On adopte donc ici par convention le fait que les capteurs fournissent un signal dépendant de la densité du milieu simulé. Quel que soit le microphone utilisé, on obtient toujours une tension sinusoïdale dans le cas de la réception d'un son sinusoïdal. La fonction de tout micro est de fournir une indication de la pression à chaque instant, ce que réalisent ici les capteurs *via* l'indication de l'état de compression dans le milieu simulé.

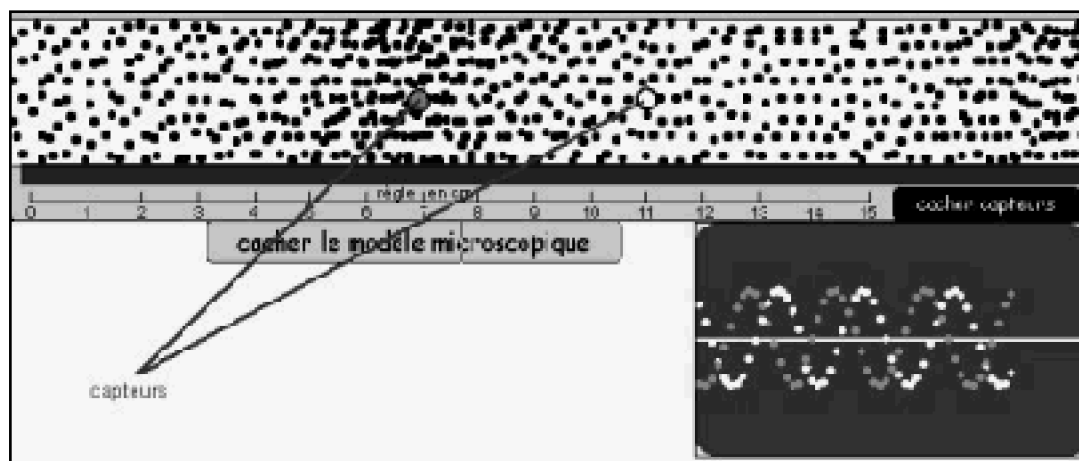


figure X.5-7 : fenêtre "capteurs et écran"

Pour effectuer une mesure, il suffit de faire glisser les capteurs sur le milieu. La (les) courbe(s) se trace(nt) alors en temps réel sur l'écran, ce qui est un avantage majeur par rapport à la situation réelle dans laquelle les fréquences en jeu sont tellement grandes que les sinusoïdes sont toujours complètes. Les faibles fréquences mises en jeu ici permettent de voir ce qui se passe dans le temps d'une part, dans l'espace d'autre part. Dans ces conditions, nous avons volontairement choisi de ne pas graduer les axes de l'oscilloscope. La base de temps est fixée une bonne fois pour toute (elle dépend du

processeur utilisé).

X.6 Simulation et expériences

Nous avons déjà eu l'occasion de dire que *simulaSON* doit être utilisé *en plus* ou *à côté* des expériences et non *à leur place*. L'articulation entre le monde de la simulation et le monde des objets et des événements est essentielle dans une stratégie efficace de modélisation aidée par la simulation.

X.6.1 Articulation entre monde simulé et monde des objets et des événements

En tant qu'outil de modélisation des situations réelles rencontrées, *simulaSON* doit être accompagné des textes des modèles proposés qui ne sont pour l'instant pas inclus au logiciel. Les liens entre éléments des mondes de la simulation et des objets/événements doivent également être explicités. L'utilisation *simulaSON* doit donc être accompagnée, en plus des modèles écrits, des documents qui décrivent ces liens. Ces documents sont fournis sur papier et l'élève doit pouvoir s'y référer à chaque instant pour donner une signification précise aux entités du monde de la simulation.

Les textes fournis, les plus courts possibles, sont les suivants :

[illegible]

Texte X.6-1 : explicitation de la signification des entités représentées à l'écran et de leur lien avec les objets réels (les fonds sont normalement de la couleur correspondant à la fenêtre en question)

X.6.2 Exemple d'utilisation avec une expérience réelle

Il nous paraît intéressant de donner un exemple d'utilisation de *simulaSON* en articulation avec une expérience réelle. Nous reprenons, pour son importance dans l'enseignement et les difficultés d'interprétation qu'elle suscite, l'expérience classique de mesure de la longueur d'onde à l'aide d'un haut-parleur (+GBF), de deux microphones et d'un oscilloscope (voir figure VI.4-4). La phase d'utilisation que nous allons décrire ici peut être intégrée aux tâches déjà mentionnées et proposées en annexes (cette phase, complexe, est constituée des dernières tâches).

Nous proposons ainsi, après quelques activités qui visent à donner du sens à la longueur d'onde (ces activités permettent en particulier de faire le lien entre ce qui est

appelé longueur d'onde et la distance entre deux compressions contiguës) et à faire le lien entre la fonction des capteurs et celle de microphones, d'élaborer à l'aide de *simulaSON* une méthode pour mesurer expérimentalement la longueur d'onde d'un son réel. L'expérience doit bien évidemment être disponible. Si la fonction des capteurs est bien comprise, l'interprétation de l'expérience réelle peut être mieux comprise (en particulier au niveau de ce que mesure les micros). Les élèves doivent donc expérimenter le modèle pour établir une stratégie de mesure de la longueur d'onde réelle : il peut par exemple s'agir de constater que lorsqu'on recule un capteur d'une longueur d'onde, les deux signaux sont à nouveau en phase (de plus, la simulation, très ralentie par rapport aux phénomènes réels, permet de mieux comprendre pourquoi il en est ainsi). Cette méthode pourra alors être utilisée pour l'expérience réelle, par *transfert* du comportement des objets du monde de la simulation à celui des objets réels.

Certaines tâches visent également à établir le lien entre longueur d'onde, période et vitesse, ce qui peut également être réinvesti pour l'expérience réelle (en calculant par exemple la vitesse du son à partir des mesures de la longueur d'onde et de la période).

X.6.3 Problèmes du lien avec la réalité

L'exemple précédent montre à quel point il faut être scrupuleux dans les liens explicites fournis à l'élève entre entités du monde de la simulation et entités du monde réel. Ce retour vers la réalité est pourtant essentiel, il doit constituer une activité à part entière et nécessite du temps (Beaufils et al., 1987b), ainsi qu'une assez bonne maîtrise et compréhension des simulations. Ce type d'activité permet également de donner au modèle le statut de mode de description *limitée* du réel.

Une expérimentation menée dans le cadre d'un mémoire professionnel à l'IUFM de Grenoble (Dusserre, 2000) a permis de mettre en évidence une efficacité rapide et nette pour résoudre des problèmes qui n'impliquent que le modèle (vibration des particules, non-déplacement de matière, alternance de compression et dilatations générées par la vibration) mais une plus grande difficulté lorsqu'il s'agit de résoudre des problèmes impliquant le champ expérimental. Il faut dire cependant que l'utilisation du logiciel pour cette expérimentation a été faite librement, sans tous les documents que nous proposons ici sur papier. Il n'y avait donc pas de précision explicite sur les liens entre objets de simulation et objets réels (en particulier les ordres de grandeurs réels n'ont pas été explicités) : ils restaient à la charge de l'élève. Ceci nous renforce dans notre conviction que cette phase doit être l'objet de tâches spécifiques et progressives. C'est le cas de certaines tâches que nous proposons. En effet, les tâches proposées⁵¹ sont, progressivement, de trois types différents :

⁵¹ Toutes les tâches sont rédigées en langage naturel (pour ne pas induire l'une ou l'autre des représentations) et incluses au logiciel (version d'expérimentation). La (re)lecture de la tâche implique une occupation totale de l'écran par le texte de la tâche, empêchant la visualisation des fenêtres. Certaines tâches donnent lieu à une vérification grâce au logiciel dans la mesure où la réponse à donner peut être fournie dans une autre fenêtre rendue disponible une fois que les élèves ont répondu. Toutes les actions des sujets sont enregistrées et la trace peut être analysée.

tâches "sémiotiques" : pour les résoudre, l'élève doit observer l'effet des modifications dans un registre sémiotique sur un autre registre (exemple d'une telle tâche : *quand la fréquence augmente, comment évolue le mouvement d'aller-retour ?*). Selon la tâche, on autorise l'ouverture de telle ou telle fenêtre, la seule fenêtre systématiquement présente étant la fenêtre "graphe". Ces tâches sont donc fortement liées au logiciel et les objets mentionnés dans la formulation sont les objets simulés. La résolution de ces tâches constitue parallèlement une phase de familiarisation avec le logiciel ;

tâches "contingentes" : elles portent sur des contenus fortement liés au monde simulé (exemple d'une telle tâche : *Dans le milieu sonore, est-ce que les particules se déplacent à travers le tuyau, de gauche à droite ?*).

tâches "de transfert" : pour les résoudre, l'élève doit utiliser les connaissances qu'il a acquises lors de la résolution des tâches contingentes dans un contexte largement différent de celui du logiciel. Ce contexte est celui de situations quotidiennes impliquant des phénomènes sonores, et plus aucune allusion aux objets simulés n'est faite dans la formulation (exemple d'une telle tâche : *Si un son devient plus fort, est-ce qu'il va plus vite ?*). Toutes les représentations sont disponibles. L'objectif est alors de voir lesquelles sont appelées prioritairement.

C'est cette dernière catégorie de tâches qui semble la plus difficile à résoudre mais qui permettrait de valider l'efficacité réelle d'une telle simulation.

X.7 Analyse critique

X.7.1 Du point de vue de la physique et du domaine de fonctionnement

Les simulations proposées dans *simulaSON* ne sont que des moyens de faire vivre des modèles qui, comme tous les modèles, ont un domaine de validité limité puisqu'ils sont des moyens forcément imparfaits de rendre compte de la réalité des phénomènes. Le savoir savant lui-même utilise des modèles qui ne dérogent pas à cette règle. Les restrictions sont encore plus fortes ici puisque les modèles utilisés s'écartent assez nettement des modèles du savoir savant. Les raisons ont largement été exposées dans l'ensemble de notre travail. Le développement d'une simulation implique des contraintes supplémentaires, techniques d'une part (calculs, rapidité du système...), liées à la représentation animée d'autres part (taille des particules, effet d'agitation...). Nous revenons ici sur ces écarts et sur les critiques que nous pouvons faire par rapport au savoir de la physique reconnu comme tel à ce sujet. Ces remarques concernent essentiellement le modèle microscopique.

Le premier problème qui se pose est celui des échelles. Les ordres de grandeurs réels de l'amplitude de déplacement des particules, de la distance interparticulaire, du libre parcours moyen mais aussi de la longueur d'onde n'ont pas été précisés. L'acoustique pose à ce sujet des problèmes considérables puisque les amplitudes

microscopiques varient, entre le seuil d'audibilité et le seuil de douleur, dans un rapport de 1 à 10^{12} . Il devenait impossible de rendre compte de ces variations avec une simulation basée sur l'image, à moins d'opérer de fréquents changements d'échelle qui nous paraissent nuire à la compréhension du phénomène en ajoutant de la complexité à la compréhension de la simulation. De plus, le respect de ces rapports d'ordre de grandeur n'aurait pas pu être corrélés avec la perception du niveau sonore (qui dépend inévitablement des circonstances dans lesquelles *simulaSON* est utilisé). Nous avons donc choisi de ne pas préciser l'échelle et de faire un lien purement qualitatif entre amplitude et niveau acoustique. Cependant, si le logiciel est intégré à une progression, les ordres de grandeurs réels des particules et des différentes représentations de la simulation doivent être donnés : cela fait partie du soin particulier à apporter aux phases de passage entre monde de la simulation et monde réel.

Nous avons cependant fait en sorte que la longueur d'onde soit effectivement bien supérieure au libre parcours moyen (même s'il est difficile de parler ici de libre parcours moyen vu le principe de la simulation). Disons que la longueur d'onde est grande devant la distance interparticulaire. La simulation permet d'ailleurs de constater que si la fréquence augmente, les échanges thermiques (tout en restant négligeables) sont favorisés car les zones comprimées sont plus proches des zones dilatées. Le logiciel permet donc, à des niveaux universitaires de discuter l'hypothèse d'adiabaticité. Signalons également que la simulation respecte les rapports entre évolution du champ de vitesse et évolution du champ de surpression (en phase), ce qui peut également être exploité dans les études supérieures.

Par contre, pour des raisons de visualisation simultanée de l'amplitude et de la longueur d'onde, l'amplitude ne peut pas être, comme dans le modèle du physicien, très inférieure à la longueur d'onde. Les perturbations ne sont pas des "petites" perturbations. L'*hypothèse acoustique* est donc loin d'être respectée.

La simulation qui est faite d'un fluide est également extrêmement simplifiée. Il était illusoire de respecter plus scrupuleusement le mouvement désordonné des particules. En effet, les modifications de trajectoires causées par l'onde sonore sont infimes par rapport au déplacement "normal" de ces particules et donc l'effet de l'onde ne serait dans ces conditions pas observables. Nous avons donc choisi de simuler des particules globalement à la même place pour permettre de visualiser clairement l'influence de la vibration sur le milieu. Cependant pour donner une idée de l'agitation permanente des particules nous leur avons donné ce mouvement autour de leur position moyenne⁵².

En ce sens, le milieu simulé est plus proche du liquide que du gaz. Les particules représentées sont une entité hybride entre le concept de "particule fluide" utilisé en mécanique des fluides et la particule de gaz ou de liquide (au sens de constituant élémentaire).

⁵² Notons à ce sujet qu'il est regrettable dans notre simulation de voir les particules immobilisées quand le trait vibrant est arrêté. Ces particules devraient continuer à s'agiter. Ce qui est pour l'instant un simple "arrêt sur image" n'est pas vraiment satisfaisant du point de vue de la simulations. C'est une modification importante à effectuer (qui pose cependant des problèmes de programmation).

Finalement, nous avons fait le choix d'éliminer, dans la représentation des phénomènes, certains aspects des modèles particuliers classiques pour ne garder que les effets de la vibration, en utilisant des "astuces" graphiques pour rendre compte de quelques caractéristiques du milieu (par exemple, la différence entre "gaz" et solide est très nette mais la comparaison doit se limiter à l'organisation des particules).

Au niveau du domaine de validité et d'application du logiciel, nous pouvons également faire quelques remarques.

SimulaSON ne permet que de simuler des ondes planes progressives monochromatiques harmoniques dont la fréquence et l'amplitude peuvent être modifiées. L'implémentation choisie permet de simuler un amortissement même si nous l'avons rendu nul dans la version jointe. La cause d'amortissement principal des sons que nous entendons habituellement n'est en effet pas due à la dissipation dans le milieu. Simuler cet amortissement dans un "tuyau" pourrait laisser penser que c'est la cause unique de la diminution des sons que nous percevons quand nous nous éloignons d'une source.

Il n'est pas possible pour l'instant de traiter d'autres signaux que des signaux harmoniques. L'acoustique musicale est donc inabordable ici. Ce serait possible avec le même type d'implémentation mais il faudrait alors réduire la taille des particules pour pouvoir distinguer des variations de densité plus petites. Les particules seraient plus nombreuses, ce qui ralentit d'autant l'animation. Ceci fait cependant partie des évolutions possibles du logiciel, au même titre que l'interfaçage à une carte d'acquisition qui pourrait permettre (par transposition explicite des fréquences et des amplitudes) de donner une représentation microscopique de sons réellement créés.

Enfin, le logiciel limite évidemment les intervalles de fréquence et d'amplitude explorés. Ceci est bien évidemment lié aux contraintes technologiques et graphiques. Les intervalles permettent cependant de rendre suffisamment compte des phénomènes dont nous visions la simulation.

X.7.2 Du point de vue de l'enseignement

Les critiques précédentes illustrent à quel point l'utilisation de *simulaSON* dans l'enseignement doit être menée avec précaution. Si une telle utilisation permet sûrement une meilleure compréhension de la nature d'un modèle par rapport à la réalité, les liens à établir entre ce qui est simulé et la réalité doivent être l'objet d'une attention toute particulière. De plus, l'utilisation par l'élève d'un tel outil, qui doit être guidée par l'enseignant, sera d'autant plus efficace qu'elle sera intégrée à une progression globale, pensée du début à la fin en référence à cette utilisation.

La "prise en main" extrêmement facile du logiciel par l'élève ne doit pas faire oublier les points de vue épistémologiques à considérer pour l'introduction d'un tel outil dans des séances d'enseignement.

Les remarques précédentes conduisent aussi à envisager l'utilisation du logiciel au niveau universitaire, sur certains aspects précis (critique de l'hypothèse d'adiabaticité, rapport de phase entre champ de pression et champ de vitesse...). A ce niveau, les critiques des modèles et de la simulation pourront même constituer une activité qui nous

paraît formatrice.

Conclusion

Notre travail s'est intéressé à l'enseignement et l'apprentissage de la physique élémentaire relative aux phénomènes sonores. Notre préoccupation ultime fut toujours l'amélioration de l'enseignement et de l'apprentissage de l'acoustique élémentaire en particulier et de la physique en général.

Ce travail a permis de développer à la fois des aspects théoriques et des méthodologies d'analyse et d'expérimentation originaux.

Ces réflexions ont permis de dégager des résultats significatifs sur les relations qu'entretiennent les savoirs de la discipline et les connaissances des élèves. à ce propos, nous avons fait le choix d'analyser attentivement d'une part les éléments constitutifs de ce que nous avons appelé les systèmes explicatifs des élèves d'autre part la signification ou les traits sémantiques que les élèves attribuent à certains termes largement utilisés par le savoir à enseigner.

Enfin, nous avons fait une large place à l'élaboration collective ou personnelle d'outils d'enseignement, que ceux-ci aient la portée générale d'une progression ou qu'ils soient des outils informatiques d'aide à l'apprentissage. Ces outils d'ingénierie ont été présentés et analysés de façon précise. Les expérimentations menées permettent de valider en partie certains aspects majeurs de la progression proposée.

Le chapitre IV a permis de formuler des questions de recherche regroupées en cinq thèmes :

1.

Les situations propices à l'enseignement	
L'élaboration de séquences d'enseignement	2.
Les effets de l'enseignement	3.
Les outils d'analyse des productions des élèves	4.
L'élaboration et le rôle des outils de simulation.	5.

Nous donnons ici les conclusions essentielles de ce travail en réponse à ces questions de recherche, tant au niveau du cadre théorique adopté que de la méthodologie mise en oeuvre, des résultats obtenus ou des propositions d'outils d'ingénierie.

Le point principal et le plus original de notre réflexion théorique est l'analyse phénoménologique que nous avons menée *a priori*. C'est le premier point au sujet duquel nous tirons des conclusions. Il fournit les premiers éléments de réponse sur les outils d'analyse pertinents de la production des élèves.

Nécessité et apport de l'analyse phénoménologique

La présence quotidienne des sons dans notre environnement les rend extrêmement familiers, et ceci depuis le plus jeune âge. Il est donc naturel que l'être humain soit capable d'agir de façon spontanée en référence à ce qu'il perçoit auditivement. Il est également normal qu'il fasse fonctionner des interprétations le plus souvent inconscientes, plus ou moins subjectives, de ses perceptions auditives et des phénomènes qu'il y associe.

Puisque la physique se donne pour objectif d'interpréter et de décrire conceptuellement les phénomènes du monde matériel, il est logique qu'elle ait donné naissance très tôt à une discipline, l'acoustique, dont les phénomènes sonores sont l'objet d'étude. Cependant la diversité des phénomènes en jeu, la multiplicité des points de vue possibles pour mieux comprendre tel ou tel aspect des phénomènes sonores font qu'il n'est plus possible de désigner *un* objet d'étude réservé à la physique mais qu'il faut au contraire reconnaître la diversité des points de vue possibles, qui se concrétise scientifiquement par un éclatement des disciplines concernées par les sons.

Ces deux points, rapport personnel quotidien aux sons et diversité des disciplines scientifiques, posent un double problème à l'enseignement de sciences physiques lorsqu'il se fixe pour objectif l'apprentissage par le débutant des concepts et modèles physiques qui permettent de décrire et d'interpréter les phénomènes sonores :

le problème de la compatibilité des savoirs de la physique avec les modes de raisonnements, les réflexes, les sensations que chaque élève a pu construire grâce à son expérience empirique préalable ;

le problème de la sélection des phénomènes qui sont étudiés par la physique.

Il est ainsi indispensable de se mettre d'accord sur ce qui constitue les caractéristiques événementielles des phénomènes en jeu. Réfléchir à la phénoménologie qu'il est possible d'avoir du son, à ce que recouvre ce concept au regard des modèles proposés par la physique nous semble constituer un apport fructueux aux recherches sur l'enseignement et l'apprentissage du domaine. Cette approche peut et devrait être étendue à tout domaine de la physique élémentaire qui traite de phénomènes communs sur lesquels les élèves peuvent avoir des points de vue très éloignés de celui de la physique. Les méthodes de recherche mises en place et les résultats qu'elles ont permis d'obtenir semblent valider une telle approche.

Cette analyse phénoménologique a permis de contribuer à la réflexion dans deux directions principales, qui s'influencent mutuellement même si elles ont été évoquées successivement dans ce travail.

Dans un premier temps, l'approche phénoménologique a permis de nouveaux angles d'analyse des savoirs en jeu : savoir savant, savoir à enseigner, voire même parfois savoir enseigné. Nous avons pu ainsi montrer comment la physique à enseigner (en particulier son noyau dur historique) privilégie les phénomènes physiques ayant lieu au niveau de la source matérielle du son et dans le milieu de propagation au détriment de la perception auditive et de son articulation avec les phénomènes physiques. En ce sens, l'acoustique physique accorde une importance capitale aux concepts de la mécanique vibratoire, *fréquence* et *amplitude* en particulier. De plus, l'onde sonore devient l'objet d'étude privilégié, parfois au milieu d'autres types d'ondes. Si la physique savante traite de l'onde à l'aide d'un formalisme mathématique adapté et puissant, ceci est cependant le plus souvent impossible pour un enseignement élémentaire. Le savoir à enseigner doit alors trouver des moyens d'observation et de mise en évidence de l'onde et de ses caractéristiques. D'où l'importance dans l'enseignement traditionnel de la vitesse de propagation, de l'illustration que la propagation nécessite un milieu matériel et que celui-ci ne se déplace pas. Pour le mécanisme de propagation, le savoir à enseigner fait le plus souvent appel à des analogies ondulatoires, dont les points communs avec les ondes sonores sont parfois très réduits.

Dans un second temps, l'approche phénoménologique a donné un nouvel éclairage aux méthodologies envisageables pour étudier la phénoménologie "naïve" des élèves, ou pour dire autrement, les *systèmes explicatifs* qu'ils utilisent lorsqu'ils sont amenés à décrire et/ou interpréter des phénomènes sonores, si possible familiers. Cet éclairage a d'abord mis en évidence que les quelques travaux sur les conceptions, pour utiles qu'ils soient, adoptent le plus souvent le point de vue de la physique en proposant des situations relativement liées au savoir à enseigner, mais surtout en faisant une analyse de ces situations et des réponses des productions des élèves du point de vue de la physique.

Or, favoriser l'apprentissage de la physique, c'est favoriser la construction, l'adoption et l'utilisation d'autres savoirs que ceux construits dans l'expérience quotidienne. C'est pour analyser ces savoirs (aussi bien ceux des élèves que ceux proposés par la physique) et pouvoir les comparer mutuellement que notre approche phénoménologique a été très utile. Nous avons pour ceci reconsidéré un champ empirique qui dépasse le champ expérimental que délimite la physique, nous nous sommes interrogés sur les moyens de perception (pas seulement auditifs) des phénomènes sonores et sur l'interaction entre ces différents canaux sensoriels. Cette approche nous a aussi permis d'analyser les moyens de description et de représentation des phénomènes sonores et des perceptions auditives, ou encore d'étudier la perception de l'influence mutuelle entre matière et sons.

Nous avons alors cherché à étudier les invariants de raisonnement (les schèmes) des élèves sur des situations formulées dans un langage quotidien mettant en jeu des phénomènes sonores simples, et sans sous-estimer *a priori* l'importance de la perception auditive ou non dans la phénoménologie des élèves. Ces invariants sont des indices des systèmes explicatifs des élèves. Nous avons alors dégagé les traits saillants de ces systèmes explicatifs, leur degré de généralité, les niveaux de savoir mis en jeu, et les aspects du son les plus facilement traités.

La méthodologie adoptée

Cette approche phénoménologique nous paraît donc indispensable pour avoir accès à la phénoménologie quotidienne des élèves et à des éléments remarquables de leurs systèmes explicatifs. Pour pouvoir prendre en compte ces résultats dans une logique d'ingénierie, il convient dans un second temps de comparer les savoirs quotidiens et les savoirs de la discipline. La méthodologie mise en place et les résultats qu'elle a permis d'obtenir permettent cette démarche. Ceci permet d'apporter des éléments de réponses aux questions du chapitre IV sur les outils d'analyse des productions des élèves d'une part, sur les situations propices à l'enseignement d'autre part.

La méthodologie adoptée pour proposer des situations à la description et à l'interprétation est largement inspirée de cette approche phénoménologique mais également de réflexions sur :

- la nature des concepts et des explications en physique et dans la vie quotidienne ;

- le savoir disciplinaire à enseigner, en détaillant ce qui relève des objets et des événements et ce qui relève des théories et des modèles.

Ceci a permis de soumettre aux élèves des questions qui concernent un champ empirique large et d'en faire une analyse selon différents critères pour pouvoir analyser ensuite les productions des élèves. Ces critères d'analyse sont les suivants :

Champ phénoménologique concerné.

Cadre conceptuel induit par la question.

Type de problème : décrire ou expliquer.

Contexte et familiarité de la situation.

Lien avec les savoirs disciplinaires.

Ce type d'analyse permet alors de définir des outils d'une analyse multiple des productions écrites des élèves, adaptés aux diverses questions posées au sujet des systèmes explicatifs. Ces outils d'analyse sont les suivants :

La généralité de l'explication fournie.

Le cadre conceptuel utilisé, à comparer avec celui qui est induit par la question : cette notion de cadre conceptuel s'est avérée extrêmement fructueuse pour rendre compte des aspects du son qui sont privilégiés (perception, événement source, entité se déplaçant...). C'est un outil qui nous paraît adapté aux domaines de la physique qui traitent de phénomènes aux multiples facettes phénoménologiques.

Le niveau de savoir adopté dans les réponses.

Les grilles assez fines de codage des productions, propres à chaque question, prennent en compte ces outils d'analyse des productions.

Cette méthodologie est également adaptée à l'étude des évolutions des productions au cours d'un enseignement puisqu'elle prend aussi en compte l'analyse du savoir disciplinaire.

Enfin, un dernier outil d'analyse fut le repérage dans les productions d'élèves de quelques termes relevant plutôt du domaine de la physique mais pouvant également avoir un usage courant. L'importance que l'analyse phénoménologique et l'analyse des savoirs disciplinaires a donné à l'articulation entre la notion (sens quotidien) et le concept (sens scientifique) représentés par un même terme a fait l'objet d'une étude spécifique. Ceci permet à nouveau, sur un plan plus linguistique, d'estimer l'écart généralement passé sous silence dans l'enseignement entre la signification spécifique et précise qu'adopte la physique pour un concept et l'usage plus flou qui peut être fait du même terme dans le langage quotidien.

Les résultats des expérimentations

Systemes explicatifs

La méthodologie mise en place a permis de dégager des tendances importantes en réponse aux questions sur les situations propices à l'enseignement mais également sur les effets de l'enseignement.

Les grandes tendances

Les premières questions du chapitre IV posent en particulier le problème de l'existence de situations familières qui favoriseraient l'utilisation (en particulier après enseignement) d'explications d'ordre général et dégagées de la situation matérielle.

Nos résultats montrent que les explications sont le plus souvent extrêmement contingentes à la situation. Les invariants de raisonnement qui seraient utilisés dans différents contextes sont très rares et les explications des élèves sont très adaptatives. Il semble cependant, pour répondre à la question sur les caractéristiques des situations favorables à l'adoption d'explications générales, que ce soit le cas des situations pour lesquelles il est possible d'avoir recours à un autre canal sensoriel que le canal auditif. De même, la représentation schématique semble favoriser ce type de comportement.

Les situations quotidiennes proposées telles qu'elles à la description et l'interprétation ne semblent donc pas propices à la conceptualisation et à l'adoption de points de vue globalisants. Il semble qu'il faille, au cours de l'enseignement, fournir des outils de conceptualisation de situations quotidiennes au sujet desquelles les élèves ont néanmoins de nombreuses idées et des avis variés. Une telle démarche, qui partirait des situations quotidiennes pour aller aux concepts, ne serait pas stérile pour l'apprentissage. Il faut donc choisir des situations quotidiennes pour la description et l'interprétation desquelles la physique propose des concepts pertinents et compréhensibles par les élèves (ceci est un premier élément de réponse aux questions sur l'élaboration de séquences d'enseignement).

Le niveau de savoir adopté dans les productions est lié à cette difficulté à invoquer des cadres d'explications adaptés à des situations diverses. La contingence des explications aux situations induit en effet des productions plutôt en termes d'objets et d'événements. En particulier, pour décrire les sons, les élèves ont davantage recours à des adjectifs courants utilisés pour la perception auditive qu'à des propriétés et concepts de la physique. Même lorsque la question est posée hors de toute situation matérielle de référence, le recours à une situation quotidienne ou déjà vécue est fréquent. Il semble donc que ce mouvement "descendant" (de situations générales vers des situations précises et contextualisées) soit bien plus facile que le mouvement inverse "ascendant" qui consisterait d'une part à utiliser des mécanismes explicatifs larges d'autre part des

concepts abstraits. Ceci peut s'expliquer par la différence de coût cognitif de ces deux processus, celui du premier étant bien plus faible que celui du second.

Enfin, nous avons montré que le cadre conceptuel considérant le son comme ce qui est d'abord perçu est largement prédominant dans bon nombre de productions. Ce qui ne fait que confirmer le décalage avec le savoir disciplinaire qui s'intéresse largement autant aux mécanismes d'émission et à l'onde sonore se propageant.

Effet de l'enseignement

La méthodologie mise en place permet de comparer les productions des mêmes élèves avant et après enseignement.

Les évolutions concernant la généralité des explications, constatées après enseignement, sont minimales, exception faite du recours plus général au déplacement du son et au concept de vibration.

Sur le plan du niveau de savoir utilisé, nous observons des évolutions assez nettes même si, globalement, les formulations continuent de se faire fréquemment en termes d'objets et d'événements. Les évolutions sont les suivantes : une augmentation de l'utilisation des propriétés physiques du son au détriment des adjectifs de description des perceptions, l'utilisation plus fréquente des concepts de *vibration* ou de *propagation dans le milieu* au détriment des descriptions en termes d'actions ou d'événements contingents à la situation. Il semble cependant que la description des sons perçus et des phénomènes en termes d'objets et d'événements de la situation soit un schème relativement résistant à l'enseignement.

De même l'adoption du cadre conceptuel considérant le son comme une perception semble très résistante. Nous constatons cependant une progression importante des points de vue descriptifs ou explicatifs qui considèrent le milieu de propagation après enseignement et le son comme une entité de déplaçant dans le milieu. Ceci est le signe de l'importance que revêtent ces aspects pour le savoir disciplinaire mais cette explication ne suffit pas. Nous sommes contraints de reconnaître que cette importance du milieu est probablement un point de vue qui est mieux accepté ou qui paraît plus utile (et plus utilisable) que d'autres aspects tout autant développés par le savoir à enseigner. A l'inverse certains points de vue utilisés avant enseignement, sur lesquels aurait pu s'appuyer le savoir à enseigner, semblent inhibés par l'enseignement (c'est le cas par exemple du "rayonnement du son" ou du phénomène de résonance).

Il reste qu'il est difficile de savoir précisément quels aspects de l'enseignement ont été déterminants dans ces évolutions positives mais très contrastées. Ceci suppose avant tout d'avoir accès au savoir effectivement enseigné. Nous avons pu avancer des éléments de réponses grâce à l'étude comparée de l'évolution de deux populations ayant suivi des enseignements soit "standard" soit élaboré dans le cadre du projet collectif auquel s'est intéressé notre travail (le projet du groupe SOC).

Approche linguistique

L'étude lexicale et sémantique que nous avons menée parallèlement a concerné certains termes choisis *a priori*. Ces termes sont soit essentiels pour le savoir à enseigner (*vibration*, *fréquence* par exemple) soit utilisés dans le langage courant au sujet des sons (*résonner* par exemple). Ils ont de plus été choisis pour leur forte polysémie (*volume* par exemple) ou leur double facette notionnelle et conceptuelle (cas de *vibration* par exemple).

Le choix des termes a été validé *a posteriori* puisque les élèves associent fortement, d'un point de vue lexical, presque tous ces termes au son après enseignement alors que l'association est relativement faible avant enseignement.

Pour chaque mot choisi, cette étude s'est fixée pour objectif de repérer les traits sémantiques attachés au terme et les contextes d'utilisation jugés spécifiques du terme. La mise au point d'une méthodologie adaptée s'est concrétisée par la passation, par un échantillon large, d'un questionnaire avant enseignement. Ceci a permis de dégager des résultats significatifs au sujet de la perception des usages et des sens des termes choisis et des éventuelles mécanismes cognitifs qu'ils induisent.

Il est alors tout à fait remarquable de constater que les résultats confirment les grandes tendances des résultats obtenus à propos des systèmes explicatifs : l'importance de la perception auditive, la difficulté à attribuer des concepts physiques au son, le possible appui de l'enseignement sur la notion de *vibration*, l'importance à accorder à la construction du concept de *fréquence* en relation avec la vibration et les sons, sont par exemple des traits importants qui peuvent être dégagés des réponses à ces questionnaires.

La concordance des résultats montre que cette méthodologie "linguistique" permet également de révéler des traits caractéristiques des systèmes explicatifs ou des processus cognitifs en jeu dans l'utilisation de la langue. Cette méthodologie permet de donner un poids supplémentaire aux résultats obtenus, sans faire double emploi. Elle permet en effet de porter un autre regard sur ces résultats mais surtout de révéler d'autres aspects essentiels, que nos premiers questionnaires n'ont pas permis de dégager. L'enseignement se doit aussi de considérer ces résultats pour repérer les points d'appui (cas d'*émettre* et de *recevoir* par exemple) ou les difficultés auxquelles il faut prêter un soin particulier (faits de polysémie avec *intensité*).

Les outils d'ingénierie

Parallèlement aux réflexions théoriques entamées et à la méthodologie d'investigation mise en place, nous avons élaboré des propositions utilisables pour l'enseignement. C'est en effet dans cette articulation entre recherche d'une part, et proposition d'outils d'ingénierie d'autre part que nous pouvons espérer contribuer à améliorer l'enseignement et l'apprentissage

L'enseignement proposé par le groupe SOC

Les séquences d'enseignement élaborées collectivement par le groupe SOC apportent des éléments de réponses aux questions de recherche du chapitre IV sur l'élaboration de séquences d'enseignement. Il s'agit en effet de s'interroger sur les situations empiriques sur lesquelles il est possible de baser un enseignement de physique qui se coupe le moins possible du champ phénoménologique sonore dans toute sa diversité. Il s'agit aussi de mettre en évidence les contraintes que fait peser sur les propositions d'enseignement le décalage entre la phénoménologie quotidienne et celle du physicien.

Le groupe SOC tente d'apporter des solutions à ces deux problèmes. Le cadre théorique considère d'une part l'importance de l'activité de modélisation pour l'apprentissage, d'autre part la nécessaire prise en compte des spécificités du champ expérimental sonore (y compris le recours le plus fréquent possible aux autres canaux sensoriels). La prise en compte de la phénoménologie des élèves (ou au moins de l'existence d'un décalage entre cette phénoménologie et celle du physicien) est ainsi effective. De plus, le dialogue et l'écriture personnelle de l'élève jouent dans cette progression un rôle essentiel.

La stratégie choisie peut être évaluée grâce à la méthodologie de recherche que nous avons adoptée. Nous apportons en ceci des éléments de réponses aux questions concernant les effets de l'enseignement. Il ressort ainsi de la comparaison des productions des deux populations étudiées que les évolutions positives mentionnées sont plus flagrantes pour la population ayant suivi l'enseignement élaboré par le groupe SOC. Plus précisément la population SOC :

- est moins démunie pour fournir descriptions et explications ;

- adopte après enseignement un niveau de savoir bien plus conceptuel que celui adopté par la population témoin ;

- est davantage capable d'expliquer des phénomènes analogues ayant lieu dans des situations différentes par un mécanisme explicatif unique. Ce point et le précédent sont particulièrement flagrants au sujet de l'utilisation du concept de vibration par la population SOC : non seulement cette utilisation est plus importante pour cette population mais surtout l'utilisation est souvent pertinente et parfois caractérisée par les concepts *fréquence* et *amplitude*. Ceci laisse penser que c'est parce que cet enseignement propose des concepts précis pour caractériser la vibration *en relation avec la perception auditive* que ce concept devient opératoire et utilisable pour interpréter des situations variées ;

- discrimine mieux ce qui relève de la perception et ce qui relève des modèles ;

semble être davantage capable de décrire le mécanisme microscopique de propagation.

Ce tableau relativement positif ne doit pas faire oublier les évolutions toutes relatives qui concernent l'ensemble de la population étudiée, la population SOC comprise.

Ces résultats nous permettent cependant de conclure que, sur un sujet comme le son encore plus que sur d'autres, les liens explicites entre ce qui relève de la perception et ce que la physique utilise pour décrire et interpréter cette perception sont nécessaires. Pour ceci, nul besoin d'expériences ou de situations compliquées. Des situations simples suffisent, du moment qu'elles sont conceptualisées peu à peu, dans une articulation constante entre ce qui relève des modèles et ce qui relève des objets et des événements.

SimulaSON

Dans la continuité du travail de SOC, nous avons personnellement, cette fois, développé un logiciel de simulation qui permet de "faire vivre" le modèle de la vibration pour la création sonore et le modèle particulière de la propagation du son. Même si l'utilisation du logiciel n'a pas fait l'objet d'expérimentation, elle a été entièrement pensée, si bien que le logiciel a effectivement été utilisé dans quelques classes. Dans le cadre de cette thèse, la question n'est donc pas tant celle de la validation de l'outil de simulation, que des problèmes théoriques que pose le présent sujet d'enseignement, et ceci à plusieurs niveaux :

- des problèmes épistémologiques sur la nature de la simulation et des activités qu'elle permet, sur le statut des entités manipulables à l'écran par rapport aux modèles et aux objets/événements ;

- des problèmes d'ordre didactique au sujet des modèles adoptés, du domaine de fonctionnement du logiciel, des rapports entre modèles à "faire vivre" pour l'élève et modèles implémentés et enfin à propos du rapport d'un tel outil à la réalité ;

- des problèmes stratégiques dans les choix à faire quant aux représentations sémiotiques adoptées et à leur articulation.

Ces questions reprennent globalement celles du chapitre IV sur l'élaboration et le rôle des outils de simulation.

Les choix effectués, dans le respect des programmes, nous semblent répondre aux difficultés mises en évidence dans les résultats des expérimentations. Il est en particulier indispensable, dans un premier temps, de permettre à l'élève de construire du sens aux concepts caractérisant la vibration en relation (même simplifiante pour un enseignement élémentaire) avec la perception auditive. Il nous a également semblé indispensable de proposer un modèle particulière animé de la propagation du son dont l'élève peut modifier

quelques paramètres de façon interactive. Même si c'est au prix d'un "masquage" des règles effectivement implémentées inaccessibles à l'élève, ceci nous paraît essentiel pour aider la compréhension et l'interprétation du mécanisme de propagation de l'onde d'une part, des expériences très instrumentalisées qui permettent d'étudier les variations spatiales et temporelles des grandeurs propagatives d'autre part. Les animations des modèles sont fidèles aux modèles préalablement élaborés par le groupe SOC, auxquels nous n'avons apporté que des modifications mineures pour pouvoir les faire vivre.

Pour que les activités de simulation soient efficaces pour l'apprentissage, nous avons choisi de clairement séparer ce qui relève du monde de la simulation de ce qui relève du monde des modèles et de celui des objets/événements. Les liens entre les entités de ces trois mondes doivent être explicités. Au-delà, le retour à la réalité à partir du comportement des entités du monde de la simulation doit faire l'objet d'une attention particulière et de phases d'apprentissage spécifiques et formatrices. De plus, les registres sémiotiques utilisés font l'objet de phases spécifiques d'apprentissage, ils sont clairement distingués, et permettent de représenter une facette de chaque concept à la fois.

Éléments de discussion et perspectives

Nous discutons ici des limites inhérentes aux méthodes que nous avons mises en place ainsi que des améliorations qu'il serait possible d'y apporter. Ceci permet de dégager des perspectives pour des recherches futures.

Au sujet de la méthodologie

Nous avons dit à quel point l'approche phénoménologique nous paraît essentielle pour des recherches qui concernent l'enseignement et l'apprentissage de la physique de phénomènes quotidiens permettant des approches individuelles variées. Ce point de vue a nécessité un "pas de côté" par rapport au savoir disciplinaire qu'il a fallu dans un second temps confronter aux points de vue quotidiens et "naïfs" sur le son. Ce travail, assez lourd, ne peut concerner que les recherches sur des apprentissages élémentaires. Nous ne disons pas qu'il serait inintéressant de mener ce type de recherche au sujet de l'apprentissage de savoirs très élaborés, reposant sur un édifice conceptuel étoffé. Cependant, notre approche ne peut pas concerner des individus qui connaîtraient déjà beaucoup de physique. Leur phénoménologie ne serait plus naïve et c'est davantage la phénoménologie "du physicien" qui serait étudiée.

La méthodologie choisie a cherché à privilégier le recueil maximum d'informations permettant un temps de traitement minimal. Il n'en reste pas moins que, dans une approche statistique, cette méthodologie est lourde. A tel point qu'un certain nombre de questions n'ont pas pu être traitées. Globalement, les données exploitées ont été sous-exploitées. Il aurait en particulier été intéressant d'observer les réponses données par un élève pour différentes questions. Le repérage individuel des élèves que nous avons effectué rend possible ce type d'analyse. De même le suivi individuel entre les deux

passages n'a pas été effectué.

L'élaboration des questions est un problème important qui demande du temps par tests successifs. Il n'y a en effet rien d'évident à proposer des situations quotidiennes les plus "dépouillées" possibles, pouvant être présentées simplement sans que la compréhension par l'élève en pâtisse.

Il aurait également été intéressant de faire passer le questionnaire "lexical" au même échantillon après enseignement. De plus, ces investigations sur certains termes choisis sont extrêmement dépendantes du contexte. Il serait intéressant, pour des recherches plus spécifiques sur ce point, de réaliser des entretiens d'explicitations après le passage du questionnaire. La remarque vaut également pour les questionnaires sur les systèmes explicatifs mais dans un cas comme dans l'autre, l'approche ne peut plus, dans ces conditions, être statistique.

Au sujet de l'ingénierie

Les enseignements que nous pouvons tirer de l'évolution des élèves ayant suivi les séquences du groupe SOC sont plutôt positifs.

Il n'en reste pas moins que nous n'avons pas la possibilité de savoir précisément ce qui est déterminant, parmi les différences entre un enseignement "classique" et celui du groupe SOC, pour les évolutions constatées. L'établissement des relations entre telle acquisition et telle activité nécessite une méthodologie spécifique basée en particulier sur une observation fine de l'activité des élèves tout au long de l'enseignement. La littérature montre par contre l'extrême difficulté d'une comparaison des liens entre causes et effets pour deux enseignements différents. Ceci restait de toute façon illusoire ici puisque nous n'avons suivi l'activité des élèves ni lors d'un enseignement "classique" (dont les textes officiels ne sont qu'une très grossière approximation) ni lors de l'enseignement expérimental du groupe SOC (ce qui, dans ce cas, a par contre été fait par d'autres recherches).

Enfin nous pourrions également nous interroger sur les effets à plus longs termes des enseignements proposés. La proposition n'est pas originale mais reste sans réponse du fait des difficultés méthodologiques auxquelles elle se heurte (suivi des élèves). Il n'en reste pas moins que sur un sujet si "familier", il est à craindre que les connaissances de physique, au mieux coexistent avec les connaissances quotidiennes, au pire disparaissent après quelques années supplémentaires d'expériences quotidiennes des sons.

L'ingénierie présentée n'a pas directement bénéficié des résultats présentés dans cette thèse, pour des raisons chronologiques. Si nous avions eu un tel projet, la question se serait effectivement posée de l'articulation entre des résultats de recherche de cet ordre, parfois éloignées du savoir à enseigner mais pourtant indispensables à la réflexion, et l'élaboration de séquences d'enseignement. Notre travail est une contribution à l'ensemble des recherches qui visent à passer de façon constructive et systématique des résultats sur les systèmes explicatifs à des propositions de contenus et de séquences d'enseignement qui en tiennent compte.

De la même façon, la didactique devrait pouvoir poursuivre ses réflexions sur l'articulation entre de tels résultats sur les systèmes explicatifs et la conception d'outils de simulation pour favoriser, entre autres, la modélisation. La démarche adoptée pour la conception de *simulaSON* contribue à ces réflexions qui restent ouvertes.

Il nous paraît à ce sujet indispensable que les chercheurs en didactique prennent *eux-mêmes* en charge la conception de ce type d'outils basés sur des résultats ou des hypothèses de recherche (sans oublier cependant les contraintes d'ingénierie si c'est la destinée du logiciel). La validation ultérieure n'en sera que plus fructueuse. Nous pouvons regretter que cette validation n'ait pas été effectuée dans notre cas. Une analyse fine de l'activité d'élèves débutants résolvant les tâches proposées serait à mener. Les conditions de l'expérience sont toutes réunies pour que celle-ci soit réalisée rapidement. Il serait également intéressant d'estimer l'effet d'un apprentissage à l'aide de *simulaSON* sur l'évolution des productions des élèves en réponses aux questionnaires proposés.

Les deux outils d'ingénierie présentés ont mis en évidence la distinction des entités impliquées dans un processus de modélisation. L'explicitation de cette distinction nous semble devoir être renforcée dans l'enseignement, surtout sur des sujets comme le son. Permettre à l'élève ces réflexions metacognitives doit faire l'objet de beaucoup de soin mais devrait pouvoir contribuer à l'acquisition d'idées plus justes sur la nature de la physique, ses objectifs, ses méthodes et le rôle des modèles qu'elles proposent. De quoi, peut-être, redorer le blason d'une discipline de plus en plus délaissée par les élèves. Nous voulons croire en effet que les raisons de ce désintérêt résident dans la méconnaissance de la discipline, bien plus que dans la pensée souvent vérifiée selon laquelle la physique n'enrichit que... l'esprit.

Bibliographie

- Ainsworth, S. Wood, D. Bibby, P. (1996) : Co-ordinating multiple representations in computer based learning environments, *Proceedings of the European Conference on Artificial Intelligence and Education*, Lisbon.
- Arnaud L. (1997) élaboration et analyse d'un TP sur le son en seconde, *mémoire de DEA, université C. Bernard, Lyon 1*.
- Asoko H.M., Leach J.T. & Scott P.H. (1991) Classroom research as a basis for professional development of teachers : a study of student's understanding of sound. *New prospects for teacher education in Europe II: Proceedings of the 16th. annual conference of ATEE*, September 1991 in Noordwijkerhout (The Netherlands).
- Asoko H. M., Leach J. T. & Scott P. H. (1992) Sounds interesting: Working with teachers to find out how children think about sound, *TOPIC, Practical Applications of Research in Education*, NFER.
- Bachelard S. (79): Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre and M. Thellier (eds) *Actes du colloque Élaboration et justification des modèles*, 3-19. Paris: Maloine.
- Baker M. & Tiberghien A. (1999) étude de la mise en oeuvre et de l'élaboration des notions fondatrices dans les situations d'enseignement : le cas de l'enseignement des sciences et des mathématiques. *Réponse à l'appel d'offre " Hétérogénéité des élèves et des étudiants. Unité et diversité de l'école à l'université " du Comité National de Coordination de la Recherche en Éducation*.
- Baker M. (1996) Argumentation et co-construction des connaissances. *Interaction et cognitions*, vol. 1 (2-3), pp. 157-191.
- Barde J. (1998) Activité de modélisation en situation de Travaux Pratiques sur le son en classe de seconde. *Mémoire de DEA de didactique des disciplines scientifiques*, université J. Fourier Grenoble 1 et L. Lumière Lyon 2.
- Barde J. (1998) Activité de modélisation en situation de Travaux Pratiques sur le son en classe de seconde. *Mémoire de DEA de didactique des disciplines scientifiques*, université J. Fourier Grenoble 1 et L. Lumière Lyon2.
- Baudot J.-C. (1998) Les sons, les bruits de la ville, au-delà des nuisances sonores. *Mémoire de fin d'étude de l'École d'architecture de Versailles*, octobre 1998.
- Baudry M., Bessonnat D., Laparra M. et Tourigny F. (1998) *La maîtrise de la langue au collège*, CNDP-Nathan, collection Collège.
- Beaufils D & Richoux H. (1996) Intégration de l'ordinateur outil d'investigation scientifique dans l'enseignement des sciences physiques au lycée, Documents et travaux de recherche en éducation, INRP, Paris.
- Beaufils D, Le Touzé J.-C., Benz H., Caubisens P. & Serra G. (1998) Un peu d'acoustique musicale, test passé par les élèves, In *Site informatique, physique et musique*, INRP-TECNE, publication électronique (, 1998.
- Beaufils D. & Le Touzé J.-C. (1998) Le sonagramme : une représentation incontournable pour l'analyse sonore. In *Site informatique, physique et musique*, INRP-TECNE, publication électronique (, 1998.
- Beaufils D. & Vilcosqui M.-J. (1998) Les rapports entre la musique et la physique : leurs

- aspects pédagogiques. In *Site informatique, physique et musique*, INRP-TECNE, publication électronique (, 1998.
- Beaufils D. (1998) A propos d'intensité, de hauteur et de timbre. In *Site informatique, physique et musique*, INRP-TECNE, publication électronique (www.inrp.fr/Acces/JIPSP/phymus/m_pedag/hauteur/hauteur.htm).
- Beaufils D., Durey A. & Journaux R. (1987a) L'ordinateur en sciences physiques, quelles simulations ? In Giordan A. & Martinand J.-L. (Eds) *IXèmes journées sur l'Éducation scientifique*, pp.321-327, Paris, Université Paris VII.
- Beaufils D., Durey A. & Journaux R. (1987b) La simulation sur ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques : quelques aspects didactiques. In Giordan A. & Martinand J.-L. (Eds) *IXèmes journées sur l'Éducation scientifique*, pp.507-514, Paris, Université Paris VII.
- Beaufils D., Le Touzé J.-C., Blondel F.-M., & Richoux B. (1997) *Images et nouvelles technologies : des activités expérimentales dans l'enseignement de la physique*. Documents et travaux de recherche en éducation, INRP-TECNE.
- Bécu-Robinault K. (1997). Rôle de l'expérience en classe de physique dans l'acquisition des connaissances sur les phénomènes énergétiques. *Thèse de doctorat*, Université Claude Bernard Lyon 1, mars 1997.
- Belhoste B. (1995) Les sciences dans l'enseignement secondaire français. Textes officiels réunis et commentés INRP, Economica, Paris.
- Blanchet A. (1987) La construction de modèles spontanés chez l'enfant et le rôle de la simulation. In *IXèmes journées sur l'Éducation scientifique*, pp.63-70, Paris, Université Paris VII.
- Bruneau M. & Didier A. (19XX) *Acoustique, propagation et production des sons*. Encyclopédie Universalis.
- Bureau National de l'UdP (1996) Enquête sur l'enseignement de physique et chimie en classe de seconde, comment donner suite ? *BUP n°788*, vol. 90, novembre 1996.
- Burgat D. (1996) Enquête réalisée auprès d'élèves de sconde depuis la mise en place des nouveaux programmes de sciences physiques. *BUP n°788*, vol. 90, novembre 1996.
- Caillot M. (1994) Des objectifs aux compétences dans l'enseignement scientifique : une évolution de vingt ans. In *Savoirs et compétences, de l'usage de ces notions dans l'école et l'entreprise*, dirigé par F. Ropé et L. Tanguy, L'Harmattan, coll. *Logiques sociales*, Paris.
- Cance C. (1994) A propos de la fréquence des sons. *BUP n° 767*, vol.88, octobre 1994, pp. 1403-1407.
- Carey S. (1985) *Conceptual change in childhood*. Bradford/MIT Press, Cambridge, MA.
- Casati R. & Dokic J. (1994) *La philosophie du son*. Éditions Jacqueline Chambon, Nîmes.
- Cassirer E. (1910) *Substance et fonction, éléments pour une théorie du concept*, 1^{ère} édition 1910, version française par Les éditions de minuit, 1977.
- Castellengo M. (1994) Perception du signal musical, *BUP vol. 88*, n°761, février 1994, pp. 197-209.

- Chaigne A. (1992) *Psychoacoustique*. Cours de deuxième année de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- Chauvet F. (1996) Un instrument pour évaluer un état conceptuel : exemple du concept de couleur. *Didaskalia* n°8, 1996.
- Chevallard Y. (1991) *La transposition didactique, du savoir savant au savoir enseigné*, 2ème édition suivi de *Un exemple de transposition didactique* de Y. Chevallard et M.-A. Johsua, La Pensée sauvage, Grenoble.
- Chi M.T.H., Slotta J.D. & de Leeuw N. (1994) From things to processes : a theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and instruction*, 4, pp.27-43.
- Chion M. (1998) *Le son*. Nathan université, Paris, 1998.
- Chomat A., Larcher C. et Méheut M. (1988) Modèle particulière et activités de modélisation. In *Aster*, n°9, pp.143-184.
- Chomat A., Larcher C. et Méheut M. (1992) Modèle particulière et démarches de modélisation. In *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*, équipe INRP/LIREST, INRP.
- Closset J.-L. (1983) Le raisonnement séquentiel en électricité, thèse de doctorat, Université Paris 7.
- Collet G. (1996) Apports linguistiques à l'analyse des mécanismes cognitifs de modélisation en sciences physiques. *Thèse de Doctorat*, octobre 1996, Institut National Polytechnique, Grenoble.
- Couturie L. (1955) *Acoustique appliquée*. Ed. Eyrolles.
- De Ketele J.-M. (1996) Méthodologie du recueil d'informations, fondements des méthodes d'observation, de questionnaires, d'interviews et d'étude de documents. Belin, Coll. Méthodes en sciences humaines.
- Derradj C., Boujemaa M., & Chaudy S. (1994) *Le son, nature et propagation pour les élèves de seconde*, Mémoire professionnel, IUFM de Lyon.
- diSessa A. (1983) Phenomenology and the evolution of intuition. In D. Gentner & A. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 15-33). Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- diSessa A. (1988) Knowledge in Pieces. In G. Forman & P. Pufall (Eds.), *Constructivism in the Computer Age*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Driver R. (1981) Pupils alternative frameworks in science, *European Journal of Science Education*, vol.3, 1, pp.93-101.
- Ducrot O. & Schaeffer J.-M. (1995) Nouveau dictionnaire encyclopédique des sciences du langage. Seuil, Paris.
- Dumas-Carré A. et Weil-Barais A. (eds) (1998) *Tutelle et médiation dans l'éducation scientifique*. P. Lang, Berne.
- Dumet V. et Lefevre R. (1995). Quelques conceptions d'étudiants sur le son. In Mary G. et Kaminsky W. (Eds), *Actes du Cinquième Séminaire de Recherche en Didactique des sciences Physiques*, Université de Reims et IUFM de REIMS, 15-17 Octobre 1995, pp. 133-140.

- Durey A. & Beauvils D. (1998) L'ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques : questions de didactique, In *Huitièmes journées Informatique et pédagogie des sciences physiques*, Montpellier, mars 1998, INRP-UdP, pp. 63-74.
- Dusserre P. (2000) Mémoire professionnel. *IUFM de Grenoble*.
- Duval R. (1995) Sémiosis et pensée humaine, registres sémiotiques et apprentissages intellectuels, Editions Peter Lang, Berne, Francfort/Main, New York, 1995.
- Fleury P. & Mathieu J.-P. (1962) *Vibrations mécaniques, acoustique*. Ed. Eyrolles, Physique Générale et expérimentale d'après le traité de L. Lemoine et A. Blanc, Paris.
- Foley B. (1994) Teaching the physics of sound with an animated computer simulation. Paper presented at *the American Educational Research Association Annual Meeting*, New Orleans, LA, April 5.
- Foley B. (1995). Using a knowledge integration approach to teach physics of sound. Conférence au National Association for Research in Science Teaching (NARST), avril 95.
- Gentilhomme (1994) L'éclatement du signifié dans les discours technoscientifiques. *Cahiers de lexicologie* n° 64, 1994-1, pp. 5-37.
- Gooding D. (1992) The procedural turn ; or, why do thought experiments work ? In *Cognitive models of Science*, Ed. R.N.Giere, University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Grémy, J-P. (1985). Simulation. *Encyclopédie Universalis*, Corpus 16.
- Groupe Technique Disciplinaire (1999) L'enseignement de la physique au lycée. Principes pour l'élaboration de nouveaux programmes.
- Guilbert L. (1973) La spécificité du terme scientifique et technique, *Langue française* n°17.
- Guillaud J.-C. (1999) Enseignement et apprentissage du concept de force en classe de troisième. *Thèse de doctorat*, université J. Fourier Grenoble 1, octobre 1998.
- Halbwachs F. (1971) Causalité linéaire et causalité circulaire en physique. In Bunge M., Halbwachs F., Kuhn T.S., Piaget J. & Rosenfeld L. *Les théories de la causalité*. P.U.F. Paris. Pp.7-18.
- Helmholtz, H.v. (1863) Théorie physiologique de la musique fondée sur l'étude des sensations auditives, Ed. J. Gabbay, Sceaux, 1990, 1^{ère} édition 1863.
- Jackendoff R. (1971) *Semantics and cognition*, The MIT Press, Cambridge, Massachussets.
- Johsua M.-A., Joshua S. (1987) Les fonctions didactiques de l'expérimental dans l'enseignement scientifique première partie. *Recherches en Didactiques des Mathématiques*, vol. 8, n° 3.
- Johsua M.-A., Joshua S. (1988) Les fonctions didactiques de l'expérimental dans l'enseignement scientifique deuxième partie. *Recherches en Didactiques des Mathématiques*, vol. 9, n° 1.
- Johsua S. & Dupin J.-J. (1989) Représentations et modélisations : le "débat scientifique" dans la classe et l'apprentissage de la physique, Peter Lang, Berne.

- Johsua S. & Dupin J.-J. (1993) *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, PUF, coll. Premier cycle, Paris.
- Johsua S. (1989) Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster "expérimenter, modéliser"*, n°8.
- Kandinsky W. (1954) *Du spirituel dans l'art, et dans la peinture en particulier*. Denoël, collection folio, 1989, 1^{ère} édition 1954.
- Kleiber G. (1990) La sémantique du prototype, catégories et sens lexical, PUF, Coll. Linguistique nouvelle.
- Kuhn, T.S. (1983) *La structure des révolutions scientifiques*, Ed. Champs, Flammarion, première édition 1962.
- Laborde C (1982) Langue naturelle et écriture symbolique, *thèse présentée à l'université scientifique et médicale*, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Lakoff, G. et Johnson, M. (1980) *Les métaphores dans la vie quotidienne*, Les Éditions de minuit, Paris.
- Lecardonnell J.-P. (1994) A propos des sons périodiques sans fondamental. *BUP* n° 767, vol.88, octobre 1994, pp. 1397-1401.
- Lecardonnell J.-P., Proust B., et Villar J.-G. (sous la direction de) (1997) *Physique Chimie seconde*, collection Galiléo, Bordas.
- Leipp E. (1989) *Acoustique et musique*, 2^e édition, Masson, 1989, 1^{ère} édition 1971.
- Lestrade A.-M., Maurel J., Tinnès J. & Winther J. (1996) Enquête sur l'enseignement de physique et chimie en classe de seconde. *BUP* n°786, vol. 90, juillet/août/septembre 1996.
- Linder C, et Erickson G. (1989). A study of tertiary physics students' conceptualizations of sound. In *International Journal of Science Education*, vol. II, n° 5, Special issue, pp. 491-501.
- Linder C. (1993). University physics students' conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation. In *International Journal of science Education*, vol, 15, n° 6, pp. 655-662.
- Linder, C. (1992) Understanding sound : so what is the problem ? *Physics education*, 27 (september 92), pp. 258-264.
- Loqueneux R. (1987) *Histoire de la physique*. Ed. Presses Universitaires de France. Coll. *Que sais-je ?* n°421.
- Luc C. & Durey A. (1997) Modèles et modélisation dans les séquences de travaux pratiques sur le haut-parleur en classe de seconde. *Didaskalia* n°11, pp. 39-72.
- Lucrèce (1^{er} s. av. J.-C.) *De la nature* (De natura rerum), édition Flammarion, 1964.
- Martinand J-L. (1987) Modèles et simulation : en guise d'introduction, In Giordan A. & Martinand J.-L. (Eds) *IXèmes journées sur l'Éducation scientifique*, pp.33-43, Paris, Université Paris VII.
- Martinand J-L. (1992) Présentation in Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences. INRP, Paris.
- Martinand J-L. (19XX) Introduction à la modélisation
- Matras J.-J. (1965) *Acoustique et électroacoustique* (Tome 1 : propagation, perception

- et production du son) Eyrolles, Paris.
- Maurines L. (1986) Premières notions sur la propagation de signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants, *thèse de doctorat*, Université Paris 7, septembre 1986.
- Maurines L. (1992). Les élèves et la propagation des signaux sonores. In *Actes du 11ème séminaire de Recherche en didactique des sciences Physiques*. Sète, 18-20 octobre 1992.
- Maurines L. (1993). Spontaneous reasoning on the propagation of sound. *In: Novak, J.: *Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Ithaca, New York: Cornell University (distributed electronically).
- Maurines L. (1998) Les élèves et la propagation des signaux sonores. *Bulletin de l'Union des Physiciens n°800*, vol. 92, janvier 1998, pp.1-22.
- Maurines L. (1999) La propagation des ondes en dimension 3 : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle géométrico-ondulatoire. *Didaskalia n°15*, pp. 87-122.
- McAdams S. & Bigand E. (1994) *Penser les sons. Psychologie cognitive de l'audition*. P.U.F. Paris. Coll. Psychologie et sciences de la pensée.
- McAdams S. (1985) L'image auditive, une métaphore pour la recherche musicale et psychologique sur l'organisation auditive.
- McCloskey M. (1983) Intuitive physics. *Scientific American*, 248, pp.114-122.
- Méheut M. (1996) Enseignement d'un modèle particulaire cinétique de gaz au collège. Questionnement et simulation. *Didaskalia n°8*, pp. 7-32, juin 1996.
- Méheut M. (1998) Construire et valider des séquences d'enseignement sur le thème de la modélisation de transformations physiques et chimiques par des élèves de collèges français. *Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches en didactique des sciences physiques*, IUFM de Créteil et LDPES-Université Paris 7, décembre 1998.
- Méheut M., Chomat A. et Larcher C. (1994) Construction d'un modèle cinétique de gaz par les élèves de collège : jeux de questionnement et de simulation. In M. Caillot (Ed.), *Actes du Quatrième Séminaire de la Recherche en Didactique des Sciences Physiques*. Amiens, IUFM de Picardie, pp. 53-71.
- Merleau-Ponty M. (1945) *Phénoménologie de la perception*, Gallimard.
- Piaget J. (1971) *Les explications causales*, vol. XXVI des Études d'épistémologie génétique, PUF.
- Picoche J. (1986) Structures sémantiques du lexique français, Nathan, Paris.
- Picoche J. (1994) *Dictionnaire étymologique du français*, Le Robert, Paris, coll. Les Usuels du Robert.
- Pierce J.-R. (1984) *Le son musical*, Belin.
- Poster G., Strike K, Hewson P. & Gertzog W. (1982) Accommodation of a scientific conception : toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66 (2), pp. 211-227.
- Psillos D. (1998) Teaching introductory electricity, in I.C.P.E. Book, section E4,

- International Commission on Physics Education 1997-1998, distribué électroniquement ().
- Putterman S. (1995) La sonoluminescence : le son transformé en lumière. *Pour la science*, n°210, pp. 42-49, avril 1995.
- Raquillet M. (1987) Le perçu et le représenté en acoustique. In Giordan A. & Martinand J.-L. (Eds) *IXèmes journées sur l'Éducation scientifique*, pp.309-314, Paris, Université Paris VII.
- Risset J.-C. (1986) Son musical et perception auditive. *Pour la Science*, novembre 1986.
- Robles A. (1997) La vidéo comme support didactique en physique. Interprétation microscopique d'un phénomène macroscopique : la propagation du son. *Thèse de Doctorat*, Université Lyon 1, juillet 1997.
- Ronan C. (1988) *Histoire mondiale des sciences*, Point seuil.
- Rosmorduc J. (1996) *L'histoire des sciences*, CNDP Hachette, collection ressources formation.
- Rozier S. (1988) Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire, *thèse de doctorat*, Université Paris 7.
- Sarmant J.-P. (1997) Introduction au Plan National de Formation : "Apport de la simulation dans les apprentissages expérimentaux", Nantes, mars 1997, *document électronique* (<http://www.educnet.education.fr/phy/intropnf.htm>).
- Séré M. G. et Moppert M. (1989). Présentation d'un modèle particulière des gaz à des élèves de 6ème. Obstacles et acquisitions. *Petit x*. n°21, pp. 31-42.
- Serres M. et Farouki N. (1997) (sous la direction de) *Le Trésor, dictionnaire des sciences*, Flammarion.
- Taton R. (1961) *Histoire générale des sciences*, vol. 1, 2, 3 et 4. PUF, Paris, 1995. 1^{ère} édition 1961.
- Tiberghien A. (1992) Commentaire sur le rapport "Expérimentations d'approches hypothético-déductives de la physique en classe de seconde" de S. Johsua et J.-J. Dupin. Document préparatoire au *Deuxième Séminaire National de Didactique des Sciences Physiques*. Non publié.
- Tiberghien A. (1994) Modelling as a basis for analysing teaching-learning situations. *in Learning and Instruction*. Vol.4. pp. 71-87.
- Tiberghien A. (1996) Construction of prototypical situations in teaching the concept of energy. In *Research in Science Education in Europe*, Current issues and themes. Welford G., Osborne J., Scott P. (Eds), London, The Falmer Press.
- Tiberghien A. (1999) Learner's modelling activities in elementary physics learning, Communication présentée au colloque *Roles of Communicative Interaction in Learning to Model in Mathematics and Science*, Ajaccio, avril 1999.
- Tiberghien A. et Megalakaki O. (1995) Characterization of a modelling activity for a first qualitative approach to the concept of energy. In *European Journal of Psychology of Education*, Vol. X, n°4, pp. 369-383.
- Tiberghien A., Veillard L., Buty C. et Le Maréchal J.-F. (1998) Analysis of Labwork

- sheets used at the upper secondary school and the first years of university. Working paper n°3, "Labwork in Science education" project.
- Tomasino A. et Pénigaud A. (1993) *Physique seconde*, Nathan.
- Tytler R. (1998) The nature of students' informal science conceptions. *International Journal of Science Education*, 20, n°8, pp.901-927.
- Varaine C. & Treillard E. (1998) Mémoire professionnel, IUFM de Lyon.
- Velay B. (1994) Éditorial, *BUP vol. 88*, n°761, février 1994, pp. 193-195.
- Vergnaud G. (1991) La théorie des champs conceptuels. *Recherche en didactique des mathématiques*, vol. 10, n°2.3, pp.133-170.
- Viennot L. (1994) A multidimensional approach in characterising a conceptual "state" in students : the role played by questions. In *European Research in Science Education : Proceedings of the second PhD Summerschool*. Thessaloniki.
- Viennot L. (1996) *Raisonnement en physique, la part du sens commun*, De Boeck Université, coll. Pratique pédagogiques.
- Vilcosqui M.-J. (1998) Extraits de textes officiels et de programmes scolaires en rapport avec la musique et la physique de 1792 à nos jours. In *Site informatique, physique et musique*, INRP-TECNE, publication électronique (www.inrp.fr/Acces/JIPSP/phymus/m_divers/histprog/ac_hist.htm)
- Vosniadou S. (1994) Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and instruction*, 4, 45-69.
- Vygotski. L.S. (1934) *Pensée et langage*. Ed.Terrain/Ed. Sociales, 1985. 1^{ère} édition 1934.
- Walliser B. (1977). *Systèmes et modèles*, Paris, Seuil.
- Weil-Barais A. & Lemeignan G. (1990) Apprentissage de concepts et modélisation, *European Journal of Psychology of Education*, vol.5, pp. 391-415.
- Weil-Barais A. (1993) *L'homme cognitif*, PUF, coll. 1^{er} cycle.

Annexes

Annexes relatives à la partie A



PROVIDED UNDER THE INFORMATION ACCESS ACT OF 1997

6-70744: 6

1. **Introduction**

1. *General*—The following information is for general information only and is not intended to be used as a basis for investment decisions. It is not intended to be used as a basis for investment decisions. It is not intended to be used as a basis for investment decisions.

For a full and complete description of the system, see the accompanying document.

- management must also be able to provide a counterweight if the business is over-extended and/or over-invested
- in general, management should be able to provide a counterweight if the business is over-extended and/or over-invested

For example, in a question about the number of ways to choose 3 people from a group of 10, the correct answer is 120. The incorrect answer is 1000.

1231-88-8 1,1-Dichloroethane

... ..

1. The number of (1) and (2) is not a multiple of 10, so the number of (1) and (2) is not a multiple of 10.

3. *La prima volta* (1964) è un'opera di grande valore artistico e culturale, che ha segnato la storia del cinema italiano. È un film che ha aperto la strada a una nuova forma di cinema, che ha messo in discussione le convenzioni del cinema tradizionale. È un film che ha fatto conoscere al grande pubblico le opere di Pier Paolo Pasolini, che ha fatto conoscere al grande pubblico la cultura popolare italiana. È un film che ha fatto conoscere al grande pubblico la cultura italiana, che ha fatto conoscere al grande pubblico la cultura italiana.

A. H. and J. J. Jones are full-time faculty with a primary focus on teaching and research in the field of international management.

© 2004 Blackwell Publishing Ltd, *Journal of Internal Medicine* 255: 105–112

For example, the authors of a recent study that examined the effects of a 12-week group-based cognitive-behavioral intervention on the self-reported health status of 100 patients with chronic low back pain found that the intervention had a significant positive effect on the patients' self-reported health status.

Il secondo gruppo di ricercatori, quello guidato da William D. Miller, si è concentrato sulle tecniche di controllo degli impulsi e sulla riduzione delle reazioni emotive. Miller ha sviluppato un programma di trattamento che si basa sulla "terapia di controllo degli impulsi" (ICP). Questo programma mira a insegnare ai pazienti a riconoscere i segnali di attivazione emotiva e a utilizzare tecniche di controllo degli impulsi per ridurre le reazioni emotive. Miller ha anche sviluppato un programma di trattamento che si basa sulla "terapia di riduzione delle reazioni emotive" (RED). Questo programma mira a insegnare ai pazienti a riconoscere i segnali di attivazione emotiva e a utilizzare tecniche di riduzione delle reazioni emotive per ridurre le reazioni emotive.

© 1997 by John Wiley & Sons, Inc.

Figure 1. The number of cases of *Salmonella* infection in the United States, 1990-1999. The number of cases of *Salmonella* infection in the United States, 1990-1999, is shown in the figure. The number of cases of *Salmonella* infection in the United States, 1990-1999, is shown in the figure. The number of cases of *Salmonella* infection in the United States, 1990-1999, is shown in the figure.

1. *Journal of Management Studies*, 1997, 34, 1, 1-15.

1. *Journal of the American Medical Association*, 1997; 277: 103-107.

- *... in the ...*
- *... in the ...*
- *... in the ...*
- *... in the ...*
- *... in the ...*
- *... in the ...*

[illegible]

1. <http://www.fishbase.org>

[illegible]

proteins, and a cell's internal structure. The cell's internal structure is called the cytoplasm. The cytoplasm is a gel-like substance that fills the cell. It is made up of water, salts, and various molecules. The cytoplasm is where most of the cell's chemical reactions take place. It is also where the cell's organelles are located. Organelles are specialized structures within the cell that perform specific functions. Examples of organelles include the nucleus, mitochondria, and Golgi apparatus. The nucleus is the control center of the cell. It contains the cell's genetic material, which is called DNA. The mitochondria are the powerhouses of the cell. They produce the energy that the cell needs to function. The Golgi apparatus is a series of stacked, flattened sacs. It is where the cell's proteins are processed and packaged for transport. The cytoplasm is also where the cell's waste products are broken down and removed. The cell's internal structure is constantly changing. As the cell grows, it needs to make more cytoplasm and organelles. As the cell divides, it needs to distribute its cytoplasm and organelles to its daughter cells. The cell's internal structure is a complex and dynamic system that allows the cell to function and survive.

It is important to note that the results of this study are only preliminary and require confirmation in a larger, more controlled study. The authors also note that the study was limited by the small sample size and the lack of a control group.

Copyright © 2000 by John Wiley & Sons, Inc.

[illegible]

1. **Introduction**

2. **Background**

3. **Methodology**

4. **Results and Discussion**

5. **Conclusion**

6. **References**

7. **Appendix**

8. **Index**

9. **Summary**

10. **Notes**

11. **References**

12. **Appendix**

13. **Index**

14. **Summary**

15. **Notes**

16. **References**

17. **Appendix**

18. **Index**

19. **Summary**

20. **Notes**

21. **References**

22. **Appendix**

23. **Index**

24. **Summary**

25. **Notes**

26. **References**

27. **Appendix**

28. **Index**

29. **Summary**

30. **Notes**

31. **References**

32. **Appendix**

33. **Index**

34. **Summary**

35. **Notes**

36. **References**

37. **Appendix**

38. **Index**

39. **Summary**

40. **Notes**

41. **References**

42. **Appendix**

43. **Index**

44. **Summary**

45. **Notes**

46. **References**

47. **Appendix**

48. **Index**

49. **Summary**

50. **Notes**

51. **References**

52. **Appendix**

53. **Index**

54. **Summary**

55. **Notes**

56. **References**

57. **Appendix**

58. **Index**

59. **Summary**

60. **Notes**

61. **References**

62. **Appendix**

63. **Index**

64. **Summary**

65. **Notes**

66. **References**

67. **Appendix**

68. **Index**

69. **Summary**

70. **Notes**

71. **References**

72. **Appendix**

73. **Index**

74. **Summary**

75. **Notes**

76. **References**

77. **Appendix**

78. **Index**

79. **Summary**

80. **Notes**

81. **References**

82. **Appendix**

83. **Index**

84. **Summary**

85. **Notes**

86. **References**

87. **Appendix**

88. **Index**

89. **Summary**

90. **Notes**

91. **References**

92. **Appendix**

93. **Index**

94. **Summary**

95. **Notes**

96. **References**

97. **Appendix**

98. **Index**

99. **Summary**

100. **Notes**

101. **References**

102. **Appendix**

103. **Index**

104. **Summary**

105. **Notes**

106. **References**

107. **Appendix**

108. **Index**

109. **Summary**

110. **Notes**

111. **References**

112. **Appendix**

113. **Index**

114. **Summary**

115. **Notes**

116. **References**

117. **Appendix**

118. **Index**

119. **Summary**

120. **Notes**

121. **References**

122. **Appendix**

123. **Index**

124. **Summary**

125. **Notes**

126. **References**

127. **Appendix**

128. **Index**

129. **Summary**

130. **Notes**

131. **References**

132. **Appendix**

133. **Index**

134. **Summary**

135. **Notes**

136. **References**

137. **Appendix**

138. **Index**

139. **Summary**

140. **Notes**

141. **References**

142. **Appendix**

143. **Index**

144. **Summary**

145. **Notes**

146. **References**

147. **Appendix**

148. **Index**

149. **Summary**

150. **Notes**

151. **References**

152. **Appendix**

153. **Index**

154. **Summary**

155. **Notes**

156. **References**

157. **Appendix**

158. **Index**

159. **Summary**

160. **Notes**

161. **References**

162. **Appendix**

163. **Index**

164. **Summary**

165. **Notes**

166. **References**

167. **Appendix**

168. **Index**

169. **Summary**

170. **Notes**

171. **References**

172. **Appendix**

173. **Index**

174. **Summary**

175. **Notes**

176. **References**

177. **Appendix**

178. **Index**

179. **Summary**

180. **Notes**

181. **References**

182. **Appendix**

183. **Index**

184. **Summary**

185. **Notes**

186. **References**

187. **Appendix**

188. **Index**

189. **Summary**

190. **Notes**

191. **References**

192. **Appendix**

193. **Index**

194. **Summary**

195. **Notes**

196. **References**

197. **Appendix**

198. **Index**

199. **Summary**

200. **Notes**

201. **References**

202. **Appendix**

203. **Index**

204. **Summary**

205. **Notes**

206. **References**

207. **Appendix**

208. **Index**

209. **Summary**

210. **Notes**

211. **References**

212. **Appendix**

213. **Index**

214. **Summary**

215. **Notes**

216. **References**

217. **Appendix**

218. **Index**

219. **Summary**

220. **Notes**

221. **References**

222. **Appendix**

223. **Index**

224. **Summary**

225. **Notes**

226. **References**

227. **Appendix**

228. **Index**

229. **Summary**

230. **Notes**

231. **References**

232. **Appendix**

233. **Index**

234. **Summary**

235. **Notes**

236. **References**

237. **Appendix**

238. **Index**

239. **Summary**

240. **Notes**

241. **References**

242. **Appendix**

243. **Index**

244. **Summary**

245. **Notes**

246. **References**

247. **Appendix**

248. **Index**

249. **Summary**

250. **Notes**

251. **References**

252. **Appendix**

253. **Index**

254. **Summary**

255. **Notes**

256. **References**

257. **Appendix**

258. **Index**

259. **Summary**

260. **Notes**

261. **References**

262. **Appendix**

263. **Index**

264. **Summary**

265. **Notes**

266. **References**

267. **Appendix**

268. **Index**

269. **Summary**

270. **Notes**

271. **References**

272. **Appendix**

273. **Index**

274. **Summary**

275. **Notes**

276. **References**

277. <

Downloaded from <http://ajph.org/> on June 11, 2015

• **विद्यया ऽमृतमश्नुते**

[illegible]

For a complete analysis of the data, see the Appendix.

For the purpose of this study, the following definitions were used:

- Adaptation:** The process by which an individual adjusts to a new environment.
- Acclimation:** The process by which an individual adjusts to a new environment.
- Acclimatization:** The process by which an individual adjusts to a new environment.
- Adaptation:** The process by which an individual adjusts to a new environment.

¹ *Id.* at 10, 11-12 and *supra* note 1, *infra* note 1.

[illegible]

1. Definition: A function $f: X \rightarrow Y$ is called a linear map if it satisfies the following properties:

Received 14 July 2015

Example

הוא נשאל: "האם אתה יכול להגיד לי מה זה?"

[illegible]

Volume 10, Number 1, Spring 1998
 Published by the American Psychological Association
 Copyright 1998 by the American Psychological Association
 0893-3200/98/1000-0000\$05.00/0

33: Number of
 34:
 35:
 36:
 37:
 38:
 39:
 40:
 41:
 42:
 43:
 44:
 45:
 46:
 47:
 48:
 49:
 50:
 51:
 52:
 53:
 54:
 55:
 56:
 57:
 58:
 59:
 60:
 61:
 62:
 63:
 64:
 65:
 66:
 67:
 68:
 69:
 70:
 71:
 72:
 73:
 74:
 75:
 76:
 77:
 78:
 79:
 80:
 81:
 82:
 83:
 84:
 85:
 86:
 87:
 88:
 89:
 90:
 91:
 92:
 93:
 94:
 95:
 96:
 97:
 98:
 99:
 100:

1. The first step is to identify the problem or question that needs to be answered. This involves understanding the context and the specific requirements of the task.

1. The first step is to identify the problem. This involves understanding the current situation and what needs to be changed.

... ..

© 1999 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

RESULTS

James J. Morgan, Jr., is the executive director of the National Center for the Study of the Holocaust, the Genocide, and the Human Rights, located at the University of Connecticut. He is also a professor of history and director of the Center for the Study of the Holocaust, the Genocide, and the Human Rights. He is the author of *The Holocaust: A History* and *The Holocaust: A History*.

• Implement the following four measures to help stop the war on terror against us:

1. *Identify the main idea of the passage.*
 2. *Identify the supporting details.*
 3. *Identify the author's purpose.*
 4. *Identify the author's tone.*
 5. *Identify the author's bias.*
 6. *Identify the author's point of view.*
 7. *Identify the author's audience.*
 8. *Identify the author's style.*
 9. *Identify the author's structure.*
 10. *Identify the author's language.*

1. The first step is to identify the problem.

[illegible]

1. Comp. Fluids 1995, 20, 1-10.

— — — — —

© 2000 Blackwell Science Ltd
Journal of Internal Medicine 247: 391–398

...proven de la comarca en 2002: 0 11 19
...proven de la comarca en 2002: 0 11 19

... what is the point of the exercise?

Phrynosoma hernandesi is recorded from
populations common.
very abundant among humbler
of the forest. It is common
in the lowland rainforest.

1. *Chrysomelidae*: 100 species, 10 genera, 10 families.

1. *Author's name*
 2. *Author's address*

As a result, the number of people in the U.S. who are poor has increased from 37 million in 1967 to 43 million in 1990, and the number of people in the U.S. who are poor and African American has increased from 12 million in 1967 to 15 million in 1990.

... ..
... ..
... ..

[illegible]

For: amanda.ross@hugoboss.com
 cc: amanda.ross@hugoboss.com; amanda.ross@hugoboss.com
 Date: 2010-07-26 10:00:00

There is a lot of information available on the Internet about the various types of business structures. It is important to understand the differences between the various types of business structures and to choose the one that is best for your business. The following information is intended to provide a general overview of the various types of business structures and to help you make an informed decision about which one to choose for your business.

1. *Formal* (formal methods) of
 2. *Informal* (informal methods) of
 3. *Hybrid* (hybrid methods) of
 4. *Other* (other methods) of

1. *Prüfung der Voraussetzungen*

© 2000 by John Wiley & Sons, Inc.

1. The first step is to identify the problem. In this case, the problem is that the user is unable to access the internet.

Contenus	Compétences exigibles au cours d'apprentissage ¹
Propagation rectiligne, réflexion éventuellement diffraction des ondes ultrasonores. Analogies et différences avec le domaine audible. A l'aide de l'ordinateur : la somme de fonctions sinusoïdales de fréquences $n, 2N, 3N, \dots$ est une fonction périodique de fréquences N. A l'aide de l'ordinateur, un son (par exemple celui d'un instrument d'élève) analysé, le spectre en fréquences donne le fondamental et les harmoniques. Principe du synthétiseur. Exploitation de documents comparant les sons émis par différents instruments de musique : timbre et tessiture. Utilisation d'un montage amplificateur à ampli-opérateur pour amplifier la tension issue d'un microphone ou d'un microphone. Lecture et analyse critique de notices d'appareils H-Fi.	

1. INTRODUCTION

¹ http://www.irs.gov/irm/part1/irm101/01b010101_01.html

[illegible]

Les services de santé (H.S.) ont été financés par le gouvernement fédéral, les provinces et les municipalités. Les services de santé ont été financés par le gouvernement fédéral, les provinces et les municipalités.

There are two parameters of the model which are not directly measurable: the true mean and variance of the MRP for each asset, and also the different volatility levels of the MRP for each asset. The volatility of the MRP for each asset is assumed to be the same as the volatility of the stock price for each asset. The volatility of the stock price for each asset is assumed to be the same as the volatility of the stock price for the market as a whole. The volatility of the stock price for the market as a whole is assumed to be the same as the volatility of the stock price for the market as a whole. The volatility of the stock price for the market as a whole is assumed to be the same as the volatility of the stock price for the market as a whole.

¹ The following studies indicate that even though the majority of the population in the United States is white, the majority of the population in the United States is not white. The majority of the population in the United States is not white.

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100. 101. 102. 103. 104. 105. 106. 107. 108. 109. 110. 111. 112. 113. 114. 115. 116. 117. 118. 119. 120. 121. 122. 123. 124. 125. 126. 127. 128. 129. 130. 131. 132. 133. 134. 135. 136. 137. 138. 139. 140. 141. 142. 143. 144. 145. 146. 147. 148. 149. 150. 151. 152. 153. 154. 155. 156. 157. 158. 159. 160. 161. 162. 163. 164. 165. 166. 167. 168. 169. 170. 171. 172. 173. 174. 175. 176. 177. 178. 179. 180. 181. 182. 183. 184. 185. 186. 187. 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 197. 198. 199. 200. 201. 202. 203. 204. 205. 206. 207. 208. 209. 210. 211. 212. 213. 214. 215. 216. 217. 218. 219. 220. 221. 222. 223. 224. 225. 226. 227. 228. 229. 230. 231. 232. 233. 234. 235. 236. 237. 238. 239. 240. 241. 242. 243. 244. 245. 246. 247. 248. 249. 250. 251. 252. 253. 254. 255. 256. 257. 258. 259. 260. 261. 262. 263. 264. 265. 266. 267. 268. 269. 270. 271. 272. 273. 274. 275. 276. 277. 278. 279. 280. 281. 282. 283. 284. 285. 286. 287. 288. 289. 290. 291. 292. 293. 294. 295. 296. 297. 298. 299. 300. 301. 302. 303. 304. 305. 306. 307. 308. 309. 310. 311. 312. 313. 314. 315. 316. 317. 318. 319. 320. 321. 322. 323. 324. 325. 326. 327. 328. 329. 330. 331. 332. 333. 334. 335. 336. 337. 338. 339. 340. 341. 342. 343. 344. 345. 346. 347. 348. 349. 350. 351. 352. 353. 354. 355. 356. 357. 358. 359. 360. 361. 362. 363. 364. 365. 366. 367. 368. 369. 370. 371. 372. 373. 374. 375. 376. 377. 378. 379. 380. 381. 382. 383. 384. 385. 386. 387. 388. 389. 390. 391. 392. 393. 394. 395. 396. 397. 398. 399. 400. 401. 402. 403. 404. 405. 406. 407. 408. 409. 410. 411. 412. 413. 414. 415. 416. 417. 418. 419. 420. 421. 422. 423. 424. 425. 426. 427. 428. 429. 430. 431. 432. 433. 434. 435. 436. 437. 438. 439. 440. 441. 442. 443. 444. 445. 446. 447. 448. 449. 450. 451. 452. 453. 454. 455. 456. 457. 458. 459. 460. 461. 462. 463. 464. 465. 466. 467. 468. 469. 470. 471. 472. 473. 474. 475. 476. 477. 478. 479. 480. 481. 482. 483. 484. 485. 486. 487. 488. 489. 490. 491. 492. 493. 494. 495. 496. 497. 498. 499. 500. 501. 502. 503. 504. 505. 506. 507. 508. 509. 510. 511. 512. 513. 514. 515. 516. 517. 518. 519. 520. 521. 522. 523. 524. 525. 526. 527. 528. 529. 530. 531. 532. 533. 534. 535. 536. 537. 538. 539. 540. 541. 542. 543. 544. 545. 546. 547. 548. 549. 550. 551. 552. 553. 554. 555. 556. 557. 558. 559. 560. 561. 562. 563. 564. 565. 566. 567. 568. 569. 570. 571. 572. 573. 574. 575. 576. 577. 578. 579. 580. 581. 582. 583. 584. 585. 586. 587. 588. 589. 590. 591. 592. 593. 594. 595. 596. 597. 598. 599. 600. 601. 602. 603. 604. 605. 606. 607. 608. 609. 610. 611. 612. 613. 614. 615. 616. 617. 618. 619. 620. 621. 622. 623. 624. 625. 626. 627. 628. 629. 630. 631. 632. 633. 634. 635. 636. 637. 638. 639. 640. 641. 642. 643. 644. 645. 646. 647. 648. 649. 650. 651. 652. 653. 654. 655. 656. 657. 658. 659. 660. 661. 662. 663. 664. 665. 666. 667. 668. 669. 670. 671. 672. 673. 674. 675. 676. 677. 678. 679. 680. 681. 682. 683. 684. 685. 686. 687. 688. 689. 690. 691. 692. 693. 694. 695. 696. 697. 698. 699. 700. 701. 702. 703. 704. 705. 706. 707. 708. 709. 710. 711. 712. 713. 714. 715. 716. 717. 718. 719. 720. 721. 722. 723. 724. 725. 726. 727. 728. 729. 730. 731. 732. 733. 734. 735. 736. 737. 738. 739. 740. 741. 742. 743. 744. 745. 746. 747. 748. 749. 750. 751. 752. 753. 754. 755. 756. 757. 758. 759. 760. 761. 762. 763. 764. 765. 766. 767. 768. 769. 770. 771. 772. 773. 774. 775. 776. 777. 778. 779. 780. 781. 782. 783. 784. 785. 786. 787. 788. 789. 790. 791. 792. 793. 794. 795. 796. 797. 798. 799. 800. 801. 802. 803. 804. 805. 806. 807. 808. 809. 810. 811. 812. 813. 814. 815. 816. 817. 818. 819. 820. 821. 822. 823. 824. 825. 826. 827. 828. 829. 830. 831. 832. 833. 834. 835. 836. 837. 838. 839. 840. 84

For example, a 2002 study published in *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry* found that children with ADHD who were treated with medication had better academic outcomes than those who were not treated.

4. $\frac{1}{2} \log 1000$ [illegible]

* *Interpretation:* The number of votes cast in favour of international disarmament was more than twice as many as those voting against it.

The authors are very grateful to the staff of the Department of Statistics, University of Oxford, for their assistance in the collection of data. The authors are also grateful to the referees for their constructive comments. The authors are also grateful to the referees for their constructive comments. The authors are also grateful to the referees for their constructive comments.

3. *Anterior compartment*: contains the anterior tibial muscle, which originates from the anterior surface of the tibia and inserts into the first metatarsal bone.

3.1. Model description

[illegible]

Per il calcolo dei costi, il bilancio d'esercizio dell'azienda deve essere approvato dalla giunta di amministrazione della società, che appone la propria firma e quella del presidente del consiglio di amministrazione.

It is the author's hope that this book will be useful to a wide range of students and scholars in the field of international law, and that it will provide a useful and accessible introduction to the study of international law in the context of the United Nations. The book is written in a clear and concise style, and is intended to be a useful resource for students and scholars alike. The author has drawn on a wide range of sources, including the United Nations Charter, the International Law Commission's work, and the work of other scholars in the field. The book is written in a clear and concise style, and is intended to be a useful resource for students and scholars alike.

¹⁴ A respeito da grandeza matemática π , veja, por exemplo, o site www.terra.com.br/educacao/curiosidades/curiosidades_pi.htm.

[illegible]

For $\lambda \in \mathbb{C}$, let $\mathcal{H}_\lambda$ be the Hilbert space of functions f on $\mathbb{R}^n$ such that $\|f\|_\lambda^2 = \int_{\mathbb{R}^n} |f(x)|^2 e^{-\lambda|x|^2} dx < \infty$. For $\lambda \in \mathbb{C}$, let $\mathcal{H}_\lambda$ be the Hilbert space of functions f on $\mathbb{R}^n$ such that $\|f\|_\lambda^2 = \int_{\mathbb{R}^n} |f(x)|^2 e^{-\lambda|x|^2} dx < \infty$. For $\lambda \in \mathbb{C}$, let $\mathcal{H}_\lambda$ be the Hilbert space of functions f on $\mathbb{R}^n$ such that $\|f\|_\lambda^2 = \int_{\mathbb{R}^n} |f(x)|^2 e^{-\lambda|x|^2} dx < \infty$.

Quelle que soit l'indiscutable utilité des mathématiques, il faudra, au niveau du lycée, éviter de remplacer l'approche qualitative des phénomènes par des modélisations quantitatives qui doivent, pour l'essentiel, être réservées aux classes terminales de sciences et de technologie industrielle.

"Cyberthèses ou Plateforme" - © Celui de l'auteur ou l'autre

des développements pédagogiques intéressants et surtout motivants ; cela vaut pour la mécanique (Aristote, Galilée, Newton...) comme pour l'électricité ou la structure atomique (Démocrite, Mendeleev, Bohr...).

L'initiation à la pratique expérimentale de l'élève comporte nécessairement, dans les expériences qu'il réalise, des tâtonnements et des échecs qui sont partie intégrante de cette pratique.

De manière générale, on évitera toute présentation dogmatique, à fortiori toute présentation axiomatique.

En vue d'alléger les programmes de physique et de chimie des lycées généraux d'environ un quart, les rubriques suivantes de ces programmes sont modifiées ou supprimées. Les professeurs peuvent appliquer tout ou partie de ces allègements selon le travail déjà effectué. Il paraît indispensable de rappeler que les activités support ne sont que des propositions d'activités, non obligatoires, dont la liste n'est pas exhaustive. Les propositions de la colonne de droite sont là pour aider le professeur à délimiter les activités qu'il entreprend dans sa classe mais sa liberté pédagogique sur le choix de ces activités reste totale. Il serait important aussi de signaler qu'un certain nombre de contenus peuvent être judicieusement exploités sous forme d'exercices, travaux de recherche et ne pas faire l'objet de « cours » ; c'est là un moyen de développer réflexion, autonomie, esprit critique.

SECONDE Référence : arrêté du 10 juillet 1992, BOEN hors-série du 24 septembre 1992, tome I.

Physique Principe : La première partie de ce programme (électricité) est réduite au strict nécessaire pour aborder l'essentiel (les ondes). La partie « son » est allégée d'un certain nombre de considérations peu précises, peu abordables à ce niveau ou non essentielles.

1.3 « Amplificateur opérationnel ». Cette rubrique est modifiée comme suit : « Le câblage et la théorie du fonctionnement de l'amplificateur opérationnel ne sont pas au programme. On se contentera d'utiliser un amplificateur, d'identifier l'entrée, la sortie et l'alimentation, de définir et de mesurer expérimentalement le gain en constatant l'existence d'un régime linéaire et d'une saturation. »

2 - Dans la rubrique « Sons et ultrasons », l'illustration des phénomènes ondulatoires avec une cuve à ondes (ou avec une « échelle de perroquet ») est vivement encouragée pour une première approche des notions de fréquence, période, longueur d'onde, vitesse de propagation ; les compétences et les activités support doivent être interprétées en conséquence.

2.1.4 « Principe du haut-parleur ». La rubrique « Conditions de fonctionnement : limites sur l'amplitude (notions de puissance admissible) » est supprimée ; est en revanche conservée la rubrique « limites sur la fréquence (bande passante) ».

2.2.1 La rubrique « Interprétation microscopique du son » doit être limitée à l'affirmation que « le son est une oscillation de pression qui se propage ».

2.2.2 La rubrique « Principe du microphone, un exemple de capteur : le microphone électrodynamique » est remplacée par « Principe d'un microphone : le microphone

électrodynamique ».

Dans les compétences correspondantes, la rubrique « L'énergie acquise par le récepteur s'est propagée depuis l'émetteur » est supprimée.

2.2.4 La rubrique « Éléments d'acoustique géométrique. Expériences sur les ultrasons mettant en évidence la réflexion et l'absorption. Principe du sonar et de l'échographie » est supprimée.

2.3 « Éléments d'acoustique musicale »

* Sont supprimées les activités :

• **« Propagation rectiligne, réflexion et éventuellement diffraction des ondes ultrasonores. Analogies et différences avec le domaine audible. »**

• **« À l'aide de l'ordinateur : la somme de fonctions sinusoïdales de fréquences N , $2N$, $3N$... est une fonction périodique de fréquence N ».**

• **« Principe du synthétiseur. Exploitation de documents comparant les sons émis par différents instruments de musique : timbre et tessiture. »**

* Sont aussi supprimées les compétences suivantes :

• « Calculer une vitesse de propagation, une période, une fréquence, une longueur d'onde, connaissant les valeurs des autres grandeurs » que l'on remplacera par « vérifier expérimentalement que la longueur d'onde est égale au produit de la vitesse de propagation par la période ».

• « La loi de réflexion pour les ultrasons ».

• « Le principe du sonar. Le rôle de la réflexion et de l'absorption dans l'imagerie par échographie » (on se limitera à mentionner que le sonar et l'échographie utilisent l'émission et la réflexion d'ondes sonores).

• « Qu'un son émis par un instrument est périodique, rarement sinusoïdal. Montrer que deux sons différents de même hauteur ont même fréquence fondamentale : soit en utilisant l'oscilloscope, soit l'ordinateur, ou mieux les deux. »

* Sont supprimées, dans les commentaires, la notion de « rayon sonore » et la remarque suivante :

« Il est important de signaler que la vitesse du son est du même ordre de grandeur que la vitesse moyenne des molécules : la description microscopique contribue également à la construction d'une représentation correcte des

phénomènes ».

* Est conservée en revanche l'activité modifiée suivante :

« À l'aide de l'ordinateur : un son (par exemple celui d'un synthétiseur) est analysé, le spectre en fréquence donne le fondamental et les harmoniques ».

3.2 La rubrique « réflexion et réfraction de la lumière » est modifiée comme suit :

« Décrire le principe du confinement de la lumière à l'intérieur d'une fibre optique » ; la description détaillée des fibres à saut d'indice est supprimée, ainsi que la compétence **« Expliquer le trajet des rayons lumineux à l'intérieur d'une fibre optique à saut d'indice ».**

3.3 « Modèle ondulatoire ». Les rubriques suivantes sont supprimées :

« Détection d'un rayonnement infrarouge »

« Lampes UV »

« Effet de serre. Protection contre les UV ».

annexes relatives à la partie B

Consignes à donner à l'élève pour résoudre les différentes tâches

Répondre sur la feuille réservée à chaque tâche. Vous pouvez répondre avec des phrases mais aussi avec des schémas, des graphes ou ce que vous souhaitez.

On ne peut pas revenir en arrière sur les tâches. Il faut donc avoir répondu complètement à une tâche donnée pour passer à la suivante.

Vous disposez de deux types d'aide pour résoudre les tâches :

—
Le logiciel

—
Les textes des modèles

Il est conseillé de vous aider des modèles dès que vous le souhaitez.

Dans le cas (souhaitable) d'un travail en binôme :

Vos réponses doivent refléter l'avis du binôme. Vous devez donc vous mettre d'accord pour élaborer ensemble une réponse commune sans pour autant accepter d'emblée le point de vue l'autre.

Analyse de 5 des 7 TP proposés par le groupe SOC à l'aide de la grille d'analyse du projet européen "Labwork in Science Education"

- . TP1 : Les différents éléments de la chaîne sonore
- . TP2 : La propagation du son dans l'air
- . TP3 : Deux grandeurs caractéristiques du son
- . TP5 : Étude de récepteurs
- . TP6 : Longueur d'onde : utilisation d'un modèle

A. Résultat espéré (objectifs d'apprentissage)

| | | numéro des TP | | | | | | |
|---|--|---------------|---|---|---|---|---|---|
| | aider les élèves à | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| a | identifier des objets et des phénomènes et à se familiariser avec eux | X | X | X | | X | X | |
| b | apprendre un ou des fait(s) | X | X | X | | X | X | |
| c | apprendre un concept | X | | X | | X | X | |
| d | apprendre une relation | | X | | | | X | |
| e | apprendre une théorie/un modèle | X | X | | | | X | |
| f | apprendre comment utiliser un instrument de laboratoire courant, ou installer et utiliser un dispositif expérimental classique | | X | X | | | | |
| g | apprendre comment exécuter un mode opératoire classique | | | | | | | |
| h | apprendre | | | X | | X | X | |

| | | numéro des TP | | | | | | |
|---|---|---------------|---|---|--|---|---|--|
| | comment planifier une recherche pour s'attaquer à une question ou à un problème spécifiques | | | | | | | |
| i | apprendre comment traiter des données | | | X | | | | |
| j | apprendre comment utiliser des données pour appuyer une conclusion | X | X | X | | X | X | |
| k | apprendre comment communiquer les résultats de leur travail | | | | | | | |

B.1. Caractéristiques de la tâche

B.1.1. Ce que les élèves sont censés faire avec les objets et les observables

| | | numéro des TP | | | | | | |
|--|--|---------------|---|---|---|---|---|---|
| Ce que les élèves sont censés faire avec les objets et les observables | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | un instrument d'observation ou de mesures | | X | X | | X | X | |
| utiliser | un dispositif de laboratoire ou un montage | X | | X | | X | X | |
| | un protocole expérimental | | | | | | | |
| présenter | un objet | | | | | | | |
| | un objet | | | | | | | |
| faire | un matériau | | | | | | | |
| | qu'un événement se produise | X | X | X | | X | X | |

Suivant l'origine des données acquises par les élèves :

- **a**= monde réel, intérieur du laboratoire;
- **b**= monde réel, extérieur du labo
- **c**= vidéo/diapo;
- **d** = ordinateur ou CD-M ;
- **e**= texte

| | | Numéro des TP | | | | | | |
|----------|--------------|---------------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | un objet | a | a | | | a | | |
| | un matériau | | | | | | | |
| observer | un événement | a | a | a | | a | a | |
| | un contexte | a | a | a | | | a | |
| | une quantité | | a | a | | | a | |

B1.2. Ce que les élèves sont censés faire avec les idées

Suivant les outils à utiliser pour traiter l'information

- a = la main ou papier-crayon
- b = calculatrice de poche
- c = ordinateur

| Ce que les élèves sont censés faire avec les idées | | numéro des TP | | | | | | |
|---|---------------------------------------|---------------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| rapporter des observations | | a | a | | | | a | |
| identifier une régularité | | | | | | | a | |
| | des objets ou événements | a | a | | | a | a | |
| étudier la relation entre | des grandeurs physiques (variables) | | | | | | | |
| | des objets et des grandeurs physiques | | a | a | | | | |
| "inventer" un nouveau concept (grandeur ou entité physique) | | | | | | a | a | |
| déterminer la valeur d'une grandeur qui n'est pas mesurée directement | | a | a | a | | | a | |
| tester une prédiction | faite à partir d'une idée informelle | a | | a | | | | |
| | faite à partir d'un modèle théorique | | | | | a | a | |
| rendre | | a | a | | | | a | |

| Ce que les élèves sont censés faire avec les idées | numéro des TP | | | | | | |
|--|---------------|--|--|--|--|--|--|
| compte d'observations en proposant une explication en terme d'un modèle ou théorie | | | | | | | |
| choisir entre deux (ou plus) explications | | | | | | | |

B1.3. Degré d'ouverture ou de fermeture

- a = décidé par le professeur
- b= décidé par une discussion professeur/élève
- c= décidé par l'élève

| | numéro des TP | | | | | | |
|--|---------------|----------|----------|---|---|---|---|
| Aspect de la tâche de Travaux Pratiques | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| La question à laquelle il faut s'attaquer | A | a | a | | a | a | |
| L'équipement à utiliser | a | a | a/c | | a | a | |
| Le mode opératoire à suivre | a | a | a/c | | a | a | |
| Les méthodes de traitement des données recueillies | | | | | | | |
| L'interprétation des résultats | a puis a | c puis a | c puis a | | a | c | |

B.2. Sources d'information disponibles pour l'élève

Mettre une croix dans les cases correspondantes :

| | | numéro des TP | | | | | | |
|---|--|---------------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| a | feuille de TP | X | X | X | | X | X | |
| b | livre(s) | | | | | | | |
| c | notices (des appareils), livre de données, etc.. | | | | | | | |
| d | base de donnée informatisée | | | | | | | |

Annexes relatives à la partie C

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

the system is equipped with a photodiode that can detect the presence of the laser beam.

* Φ is a continuous n -valued function defined on X if and only if Φ is a continuous n -valued function on X and Φ is a continuous n -valued function on X .

- 11. auf Schiene aufbauen
 - 12. in der ersten Steigung und in der zweiten
 - 13. in der ersten Steigung parallel zur Fahrbahn
 - 14. in der zweiten Steigung parallel zur Fahrbahn
 - 15. in der ersten Steigung parallel zur Fahrbahn
 - 16. in der zweiten Steigung parallel zur Fahrbahn

It is not possible to provide a complete list of the references used in this paper. The references are available in the full text of the paper.

* Lactobacillus acidophilus, Bifidobacterium lactis

[illegible]

Question B

—
je ne sais pas

Expliquer votre réponse



Codage

| variable | BA | BB |
|------------|----------------|-------------|
| descriptif | réponse cochée | explication |
| exemple | 1 | 3 |

- réponse cochée :
- 0 - oui
- 1 - non
- 0 - jnsp

On adopte un seul codage pour les deux types de réponses.

- | | |
|---|------|
| Pas d'info | 1. |
| pas d'explication | i. |
| "Je ne sais pas" | ii. |
| paraphrase | iii. |
| inexploitable | iv. |
| Perception | 2. |
| moins fort pour le "deuxième" personnage (distance non explicite) | i. |
| perception sonore propre à chaque être humain (L4103 : car on est pas tous fait de la même façon) | ii. |
| autre (en particulier, du type « propriété qui n'est pas la même » sans autre mention) | iii. |

| | |
|--|-------|
| Trajet | 3. |
| | i. |
| distance, position évoquée seules (sans référence à la différence de perception) | |
| | ii. |
| plus loin (différence de position, distance explicites)=> moins fort ou <i>caractère perceptif</i> équivalent (plus amorti, on entend moins bien) | |
| | iii. |
| plus loin (différence de position ou distance explicites)=> <i>propriété</i> du son change (amplitude, intensité, puissance, force, niveau sonore...) | |
| | iv. |
| déplacement du son, idée dynamique, parcours => moins fort ou <i>caractère perceptif</i> équivalent (plus amorti, on entend moins bien) (C2a) | |
| | v. |
| déplacement du son, idée dynamique, parcours => <i>propriété</i> du son change (amplitude, intensité, puissance, force, niveau sonore...)(C2a) | |
| | vi. |
| distance ou déplacement du son => évolution d'un <i>caractère perceptif</i> non équivalent à fort/faible (C2a) | |
| | vii. |
| distance ou déplacement du son => évolution d'une <i>propriété</i> non liée à fort/faible (fréquence, vitesse, vibrations...) (C2a) | |
| | viii. |
| le son se répand, se dissipe, se répartit, se perd...dans plus d'espace (donc moins fort) (C2b) | |
| | ix. |
| Distance pas assez grande pour que les personnages perçoivent une différence | |
| | x. |
| son ou propriété du son non affecté par le déplacement | |
| | xi. |
| Décalage temporel et plus fort ("L4120 : " les ondes sonores se déplace et arrive cher le 1 ^{er} personnage avant le deuxième, donc le 1 ^{er} entend plus fort") | |
| | xii. |
| Décalage temporel ou quasi-simultanéité | |
| | xiii. |
| l'air atténue le son, étouffe... | |
| | xiv. |
| autre | |

- Source 4.
- unicité du téléphone (le téléphone n'a qu'une sonnerie) i.
- unicité du son émis ou équivalent ii.
- autre iii.
- autre 5.

Question C

Est-ce qu'un son, ça se déplace ?

- . oui
- . non
- . je ne sais pas

Justifiez rapidement en donnant éventuellement un exemple

Codage

| variable | CA | CB | CC | |
|------------|----------------|-------------|----------------|---|
| descriptif | réponse cochée | explication | exemple choisi | réponse cochée :
1/oui 2/non
0/jnsp |

CB : explication

- Pas d'info 1.
- pas d'explication i.
- "Je ne sais pas" ii.
- iii.

| | |
|--|-------|
| paraphrase | |
| inexploitable | iv. |
| Perception | 2. |
| car sinon on entendrait pas, on ne pourrait rien entendre.... | i. |
| un son va de l'oreille au cerveau (tout se passe à partir de l'oreille) | ii. |
| autre | iii. |
| Trajet | 3. |
| Exposé d'un savoir | i. |
| empirisme encyclopédique non expliqué ("je sais que ça se déplace, j'ai entendu dire) | ii. |
| car la vitesse du son existe ("puisque'on parle de vitesse du son") | iii. |
| existence d'une valeur de la vitesse du son, donnée ou pas (L102_30 : "la vitesse du mur du son") | iv. |
| relation distance temps implicite (situation pouvant <i>potentiellement</i> fournir une estimation de la vitesse (échos, feu d'artifice...)) | v. |
| situation citée seule ("l'écho") | vi. |
| observation d'un décalage entre perception visuelle et sonore | vii. |
| relation distance temps explicite (situation pouvant <i>potentiellement</i> fournir une estimation de la vitesse) | viii. |
| relation distance temps explicite : distance mise en jeu trop petite pour percevoir un décalage | ix. |
| décalage temporel corrélé explicitement avec déplacement (sans forcément d'allusion à | x. |

| | |
|--|--------|
| une observation particulière) | |
| existence en dehors de la source avec ou sans mention d'un récepteur | xi. |
| va d'un émetteur à un récepteur (existence à source et récepteur, éventuellement avec deux récepteurs différents) | xii. |
| existence en dehors de la source | xiii. |
| situation de la question B | xiv. |
| son se déplace à l'aide d'un moyen de transport | xv. |
| air (ou gaz) permet le déplacement du son | xvi. |
| vent permet le déplacement du son (<i>A2112 : "le vent peut transporter un son"</i>) | xvii. |
| autre entité que le son se déplaçant ou "se déplacer" remplacer par un autre mot | xviii. |
| vibration ("c'est pas le son qui se déplace, ce sont des vibrations") | xix. |
| ondes | xx. |
| Le son se propage (<i>L10221 : "il ne se déplace pas il se propage"</i>) | xxi. |
| autre entité | xxii. |
| rebond et déplacement explicite (écholocation ou écho) (<i>L6315 : "les animaux qui ne voient pas comme la chauve-souris lance un son qui rebondit sur les murs comme ça la chauve-souris sait où aller"</i>) (2a) | xxiii. |
| diffusion, rayonnement... dans l'espace disponible (<i>L102_31 : "je ne dirais pas que le son se déplace mais plutôt qu'il se répand "</i>) (2b) | xxiv. |
| autre | xxv. |
| Source | 4. |

- | | |
|--|------|
| la source se déplace(L6324 : "le son se déplace en même temps qu'une voiture par exemple") | i. |
| vibration (donc mouvement) de la source | ii. |
| le son reste localisé autour de l'objet émetteur (L1117« Lorsque j'écoute de la musique, le son reste là où je l'écoute ») | iii. |
| autre | 5. |
| situation dans laquelle un signal sonore est transmis par un support électromagnétique (L102_26 : " à la télé, une personne en direct a un décalage au niveau du son et de ses lèvres ", L102_25 : " Dans les ordinateurs le son part de la carte son puis sort par les haut-parleurs ") | i. |
| autre | ii. |
| CC : exemple choisi | |
| Aucun de la liste | 1. |
| Orage.éclairs | 2. |
| Echo | 3. |
| Feux d'artifice / Canon / départ d'une course | 4. |
| Avion / mur du son | 5. |
| Instrument de communication par ondes électromagnétiques. | 6. |

Question D

Lorsqu'on est à un concert en plein air (dans un grand champ par exemple, sans mur autour), plus on recule, moins on entend fort. Essayez d'expliquer pourquoi.

Codage

| variable | DA | DL |
|------------|-------------|----|
| descriptif | explication | |

1. Pas d'info
- i. pas d'explication
- ii. "Je ne sais pas"
- iii. paraphrase
- iv. inexploitable
2. Perception
3. Trajet
 - i. va d'un endroit à un autre (C2a)
 - ii. plus loin, distance différente => caractère perceptif qui évolue (moins fort, moins clair, moins net, moins bien...) ou changement d'une propriété du son
 - iii. son va d'un endroit à un autre, déplacement => diminution (voir épuisement) du son ou d'une propriété du son (amplitude, intensité, puissance, tonalité, volume, vibrations...) (« l'amplitude est de plus en plus faible au fur et à mesure que le son avance »)
 - iv. son va d'un endroit à un autre => diminution de la vitesse
 - v. pas de réflexion, plus d'écho...
 - vi. rayonnement (C2b)
 - vii. se répand, se disperse, se diffuse, s'échappe, se propage dans tous les sens (impliquant éventuellement un diminution d'un caractère perceptif, du type moins fort)

| | |
|--|--------|
| se répand.... => diminution (voir épuisement) du son ou d'une propriété du son (amplitude, intensité, puissance, tonalité, volume, vibrations...) | viii. |
| se répand => diminution de la vitesse | ix. |
| son pas enfermé , pas d'obstacle, pas de résonance (L4112 : "car les sons ne se répercutent pas contre les murs : le son sera moins "concentré"", L4114 : "car il n'y a pas de caisse de résonance") | x. |
| appel explicite ou implicite à une formule (intensité= puissance / surface) | xi. |
| Action du milieu | xii. |
| résiste | xiii. |
| frotte | xiv. |
| amortit | xv. |
| freine | xvi. |
| empêche | xvii. |
| autre | xviii. |
| décalage temporel, le son arrive plus tard... (L2311« le son met plus de temps à arriver donc perd de sa puissance » | xix. |
| autre (en particulier les réponses du type « parce que le son se propage » | xx. |
| Source | 4. |
| son reste localisé autour de la source, ne peut pas atteindre une distance trop grande... | i. |
| Propriété de l'émission | ii. |
| | iii. |

autre

5.

autre

Question E

A votre avis, si un son est émis plus fort qu'un autre, est-ce qu'il va plus vite ?

- oui
- non
- je ne sais pas

Justifiez :

Codage

| variable | EA | EB1 | EB2 | EL |
|------------|-------------|---------------|---|----|
| descriptif | case cochée | justification | justification
supplémentaire
éventuelle de
préférence
réservée à
"vitesse
dépendante de " | |

réponse cochée :

- 1 - oui
- 2 - non
- 0 - jnsp
- 8 - je ne comprends pas
- 9 - pas de réponse

1.

Pas d'explication

i.

pas d'explication

"je ne sais pas"

paraphrase

inexploitable

multi-dépendances impliquant la vitesse (dépendance pas forcément explicite)

réduction ou dépendance fréquence/vitesse (L2110 : **"non, puisque lorsqu'un on fort est grave la fréquence de celui-ci est moins rapide que le fréquence de son aigu."** ; L2123 : **"l'intensité du son n'a pas de rapport avec sa fréquence"** ; L2113 : **"car sa fréquence est plus petite"** ; L2111 : **"car c'est la fréquence du son qui varie la vitesse"**)

réduction (intensité /) distance atteinte /vitesse (si je cris plus fort on m'entend plus loin donc ça va plus vite)

réduction (intensité /) qualité sonore /vitesse (si je crie plus fort, on m'entend mieux, ou plus fort, donc ça va plus vite)

réduction faculté à ne pas s'amortir /vitesse (" car si le son va plus vite, sa puissance diminue moins ")

réduction longueur d'onde /vitesse (" Un son a toujours la même longueur d'onde ")

réduction nature des ondes (ou vibration) /vitesse (" car il y a plus d'ondes mais cela reste les mêmes " "parce que les vibrations sont plus grandes" P13120, P13123)

vitesse (explicite) indépendante de

une propriété du son ou la façon de faire le son

la façon dont on crie

la fréquence (" car la vitesse du son ne dépend pas de la fréquence ")

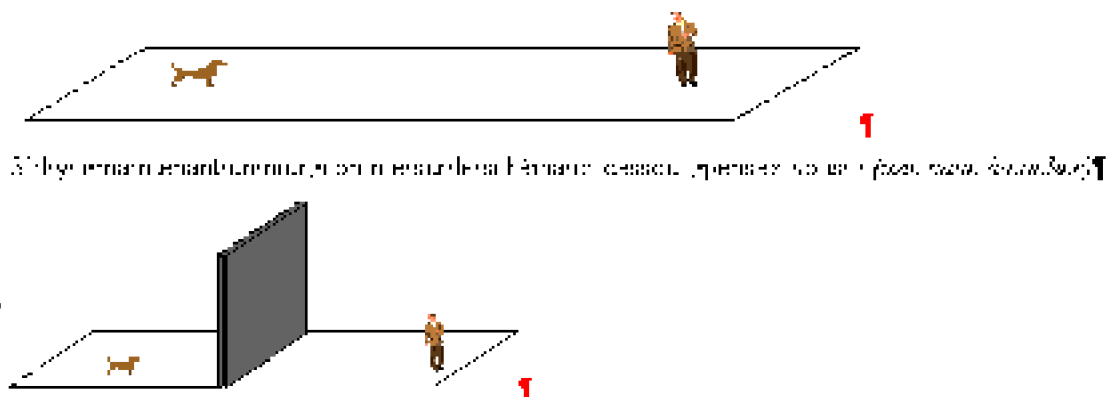
- iv. l'amplitude(" c'est juste l'amplitude qui est différente, la vitesse dépend du milieu ")
- v. l'intensité (" son intensité sonore sera plus forte mais il va à la même vitesse ") (" la vitesse du son dépend de la température et non de l'intensité ")
- vi. le volume du son
- vii. la force du son (" car la vitesse du son ne dépend pas de la force du son ")
- viii. la puissance du son (" la puissance n'a rien à voir avec la vitesse du son ", " la puissance peut être variable mais la vitesse est la même ")
- ix. la durée du son
- x. autre
- xi. la portée, distance atteinte
- xii. vitesse constante
- xiii. seul ("**la vitesse est toujours la même** ", "**car la vitesse du son est constante** "(L2109 : "**tout son va à la même vitesse**"))
- xiv. dans l'air
- xv. dans un milieu donné
- 4. Pas d'évocation de vitesse
- i. seule propriété du son ou façon de faire le son change (CC3)
- ii. seule la façon dont on crie change
- iii. seule la fréquence change
- iv. seule l'amplitude change (" ce n'est que l'amplitude qui change ")

| | |
|--|-------|
| seule l'intensité change | v. |
| seul le volume change | vi. |
| seule la force du son change | vii. |
| seule la puissance du son change | viii. |
| la durée du son | ix. |
| autre | x. |
| seule la portée, la distance atteinte change(<i>si je cris plus fort on m'entend plus loin</i>)
(CC2) | xi. |
| Vitesse dépendante de ... (<i>sous-entendu "ce paramètre est constant dans la situation"</i>) | 5. |
| température (" car si la température ne change pas, la célérité ne changera pas non plus ") | i. |
| milieu (L2126 : " le son a la même vitesse de propagation suivant les milieux "
????) | ii. |
| pression | iii. |
| recours à une analogie | 6. |
| explicitement mécanique (jet) | i. |
| ondes à la surface de l'eau | ii. |
| autre | iii. |
| interprétation microscopique | 7. |
| | 8. |

autre

Question F

- → F- Une personne entend un chien aboyer :



que la personne entend toujours la même chose. Dans ce cas justifiez :

que la personne n'entend plus la même chose. Dans ce cas justifiez en disant ce qui change :

je ne sais pas.

Codage

| variable | FA | FB | FC | FL |
|------------|----------------|--|---------------------------|--------|
| descriptif | réponse cochée | explication (grille commune quel que soit le choix multiple) | description du changement | langue |
| exemple | 1 | 2.2. | | |

réponse cochée :

- 1.entend la même chose
- 2.n'entend pas la même chose
- 0.nsp

EXPLICATION (FB)

| | |
|---|-------|
| Pas d'info | 1. |
| pas d'explication | i. |
| "je ne sais pas" | ii. |
| paraphrase | iii. |
| inexploitable (non-compris) | iv. |
| Perception (la description est seule, elle fait éventuellement fois de justification) | 2. |
| Trajet du son | 3. |
| son ne passe pas (C2a) | i. |
| le mur est un obstacle, un isolant | ii. |
| le son rebondit, butte, ricoche, se répercute... (privilegié par rapport à 211 si les deux sont présents) | iii. |
| le son est retenu par le mur ou absorbé par le son | iv. |
| son passe à travers, pénètre (C2a) | v. |
| son passe à côté, contourne, monte(sans idée de rayonnement) (C2a) (L4103 : "car le son a un chemin plus long à parcourir") | vi. |
| le son se répand partout, se disperse, se diffuse (C2b) | vii. |
| ça dépend du mur (matériau par exemple) | viii. |
| dimension(s) du mur invoquée (plutôt C2b) | ix. |
| épaisseur du mur invoquée | x. |
| | xi. |

| | |
|--|------|
| son est ralenti par le mur | |
| autre | xii. |
| Source | 4. |
| ça dépend de la source (le fait d'avoir un chien est déterminant) | i. |
| ça dépend du son émis | ii. |
| ça dépend de la force avec laquelle le son est émis | iii. |
| ça dépend de la hauteur du son (aigu/grave) | iv. |
| autre (les expressions du type « le mur change la sonorité de l'aboïement, l'amplitude...) | 5. |
| DESCRIPTION du changement (FC): | |
| pas de description du changement | 1. |
| Perception | 2. |
| le son est moins fort, plus faible,... (" arrive faiblement ", " il entend l'aboïement moins fort ") | i. |
| on entend mieux sans mur (moins bien, moins distinctement, moins net, son diminue avec le mur) | ii. |
| son coupé, arrêté par le mur, le son disparaît | iii. |
| une propriété du son liée au niveau sonore diminue (amplitude, intensité, puissance..) | iv. |
| son modifié, perturbé | v. |
| son atténué | vi. |

| | |
|---|-------|
| son étouffé, filtré, sourd | vii. |
| son devient un écho ou fait des échos (sans précision de décalage temporel) | viii. |
| son devient un bruit | ix. |
| la résonance est modifiée | x. |
| la fréquence, la hauteur, le caractère aigu/grave est modifié | xi. |
| autre caractéristique du son modifiée (ex. : tonalité) | xii. |
| Quelque chose lié au temps, au déplacement | 3. |
| la vitesse du son | i. |
| le moment de la perception | ii. |
| Source | 4. |

Question G

Cochez une des quatre propositions.

Un son,

- . ça n'existe que dans l'oreille *Dans ce cas, expliquez*
- . ça peut exister même s'il n'y a pas d'oreille Précisez alors quelques endroits où ça peut exister.
- . Autre Dans ce cas, expliquez
- . je ne sais pas

Codage

| variable | GA | GB | GL |
|------------|----------------|-------------|----|
| descriptif | réponse cochée | explication | |
| exemple | 1 | 3 | |

réponse cochée

- 4.dans l'oreille
- 5.même si pas d'oreille
- 0.jnsp
- 3.autre
- 8.je ne comprends pas
- 4.pas de réponse

Pas d'info

pas de réponse

"je ne sais pas"

paraphrase

inexploitable (non compris)

Perception

Explication sensorielle auditive(si pas d'oreille alors pas de son, le son c'est la sensation auditive, le son est fait pour être entend, le son n'existe que parce qu'on l'entend)

c'est (seulement) l'oreille, le tympan, qui capte, déchiffre, reçoit et fait qu'on entend (capacité à recevoir) ; on entend grâce aux oreilles et pas à autre chose...

invocation cerveau, esprit et liaison oreille-cerveau (y compris existence dans cerveau, esprit)

Il existe d'autres récepteurs sonores (animaux, micros...) que l'oreille

| | |
|---|-------|
| existence de sons non-audibles | v. |
| par des gens qui ne les entendent pas (les sourds par ex) (A2102 : "pour les personnes sourdes, le bruit existe sans qu'elles l'entendent") | vi. |
| il existe des sons qu'un être humain ne peut pas entendre (US et IS) | vii. |
| je peux imaginer un son sans l'entendre (L10206 : "Une chaîne stéréo produit un son même si nous n'avions pas d'oreille ce sons existerait, ce son serait la mais on ne pourrait pas l'entendre") | viii. |
| Trajet | 3. |
| le son existe dans un milieu quelconque, mentionné ou non (L4112 : "oui il est évident qu'un son existe dans l'oreille mais dans la nature aussi il y a des sons") | i. |
| déplacement / propagation (donc existence) du son dans un milieu quelconque (connaissance encyclopédique) | ii. |
| C2a : de la source à l'oreille il faut bien que ça se soit déplacé (propagé...) | iii. |
| C2b | iv. |
| le son se répand autour de la source, on peut entendre partout autour de la source | v. |
| perception du même son par deux personnes à deux endroits différents ou lorsqu'on se déplace | vi. |
| son correspond à une entité physique se propageant | vii. |
| vibration(s) (A2108 : "le son c'est des vibrations qui se propagent dans l'air") | viii. |
| onde(s) | ix. |
| autre | x. |
| l'oreille n'est que le récepteur, ne fait que capter, déchiffrer, recevoir, transformer une | xi. |

entité qui se déplace ou qui existe dans l'espace hors source (L6305 : "**D'après moi le son est le résultat direct de la vibration de l'air et ce son seul l'oreille le capte et le déchiffre**", L10227)

xii.
possibilité de percevoir une manifestation physique (via vue, toucher...) d'un son hors de la source

xiii.
toucher (vibration corporelle, on peut sentir les vibrations...)

xiv.
vue

xv.
autre

4.
Source

i.
Il suffit d'un émetteur pour avoir un son (L10213 : "**un "son" peut être émis même si il n'y a pas d'oreille (oiseaux) mais on ne peut le qualifier de son que si il peut être entendu** ")

ii.
existe à l'endroit de la source du son

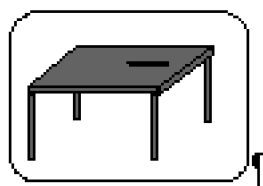
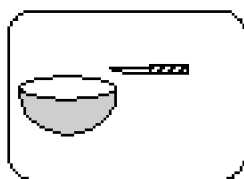
iii.
on peut voir un événement au niveau de la source (vibration, tremblement par exemple)

5.
chaîne sonore complète

6.
autre

Question H

Avec un couteau, on frappe un grand bol en verre, puis une grosse table en bois. Dans les deux cas, on a beau frapper doucement, on entend toujours quelque chose.



Essayez de dire,

ce qui fait qu'on entend quelque chose quand on frappe doucement.. Pour le verre.
Pour la table:

quand on frappe fort (sans casser le verre ni abîmer la table). Pour le verre : Pour la table:

Codage

| | bol | | table | |
|------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|
| | cause | description bruit | cause | description bruit |
| frappe doucement | HVD1 | HVD2 | HTD1 | HTD2 |
| frappe fort | HVF1 | HVF2 | HTF1 | HTF2 |

Question I (grille de codage commune à la question H)

Expliquez pourquoi il peut y avoir un son ou un bruit

- quand on frappe deux cailloux.
- quand on frotte quelque chose avec une brosse.
- quand on pince une corde de guitare.
- quand on frotte une corde de violon avec un archet.

Codage

| variable | IA | IB | IC | ID | IL |
|----------|----|----|----|----|----|
| variable | IA | IB | IC | ID | IL |

DESCRIPTION

| | |
|---|------|
| pas de description | 1. |
| fort | 2. |
| seul | i. |
| | ii. |
| plus fort (<i>"la table retentit plus fort", "on entend plus fort, les vibrations sont plus intenses"(IUT)</i>) | |
| moins fort | iii. |
| faible 0, 1, 2 | 3. |
| bref 0, 1, 2 | 4. |
| sec 0, 1, 2 | 5. |
| long 0, 1, 2 | 6. |
| aigu 0, 1, 2 | 7. |
| grave 0, 1, 2 | 8. |
| résonant 0, 1, 2 | 9. |
| sourd 0, 1, 2 | 10. |
| creux 0, 1, 2 (<i>"le bois sonne creux"</i>) | 11. |
| clair, net 0, 1, 2 (<i>"on entend un son clair avec un petit peu de résonance"(TF11)</i>) | 12. |
| amplifié | 13. |
| autre | 14. |
| CAUSE | |

| | |
|--|-------|
| Pas d'info | 1. |
| pas de réponse | i. |
| "je ne sais pas" | ii. |
| paraphrase | iii. |
| réponse non exploitable | iv. |
| Perception | 2. |
| le son est juste décrit | i. |
| l'oreille est un instrument très sensible / performant | ii. |
| c'est une illusion | iii. |
| Trajet | 3. |
| son (ou ondes) va de l'émetteur au récepteur (C2a) | i. |
| son (ou ondes) se disperse (jusqu'à nous) (C2b) | ii. |
| vibration | iii. |
| de l'air | iv. |
| des particules/ molécules d'air (L10208ap) | v. |
| de quelque chose dans l'air | vi. |
| de l'air, amplifiées par caisse de résonance | vii. |
| vibration(s) émise(s), se déplace(nt) | viii. |

| | |
|---|-------|
| Mouvement ou déplacement, compression, frottement | ix. |
| de l'air | x. |
| des particules/molécules d'air (L10208ap) | xi. |
| résonance hors objet | xii. |
| Distance trop ou pas assez grande | xiii. |
| invocation du milieu | xiv. |
| existence (seulement) d'ondes | xv. |
| autre (émission d'une entité autre que vibration ou air ou ondes) | xvi. |
| Source - action | 4. |
| choc, impact, coup, frappe, percussion (" c'est l'impact entre le couteau et le verre qui produit le son " (5)) (" la résonance du choc à l'intérieur du verre " (5), " on entend le choc entre les deux objets "(IUT), " on entend la résonance du choc entre les deux objets "(IUT), "le choc entre le couteau et la table provoque un son comme n'importe quels objets en collision "(TF11)) (" c'est le force du coup qui fait que l'on puisse entendre un son et la rencontre du fer et du verre "(5)) | i. |
| seul | ii. |
| crée des vibrations | iii. |
| contact | iv. |
| contact seul | v. |
| contact crée des vibrations | vi. |
| frottement, friction, claquement, pincement | vii. |

| | |
|---|-------|
| seul | viii. |
| crée des vibrations | ix. |
| finalité : on fait cette action pour faire du bruit, cet instrument est fait pour faire du bruit | x. |
| autre | xi. |
| propriété objet/matière | 5. |
| plein(" la table est pleine et n'est pas creuse au milieu donc on peut entendre un son ") | i. |
| plat (" la table est plate on entend donc un son bref ") | ii. |
| cassant, fragile("car le verre est fait en matière cassante ") | iii. |
| lourd | iv. |
| dur, solide | v. |
| creux (" vu que le verre est creux il y a une résonance ", " car le verre est creux donc cela fait une résonance "(5), "la forme du verre qui fait haut-parleur " (IUT)) | vi. |
| de petite ou grande taille | vii. |
| tendu | viii. |
| concret (c'est un objet matériel) ("le verre produit un son car c'est quelque chose de concret "(5), "comme la table est en bois et que le bois est une matière qui produit un son quand on la frappe, la table, elle aussi, crée un son "(5)) | ix. |
| sonore | x. |
| matériau en lui-même est responsable du bruit perçu (" la matière du bois provoque un bruit creux, sourd "(IUT), " c'est dû à la matière du verre "(IUT), "le bois sonne creux ") | xi. |

xii.
permet le passage, la propagation ("**le verre est une matière où le son se propage**
"(IUT))

xiii.
caisse de résonance, structure, forme fait résonner ("**on tape sur les parois et ça fait
caisse de résonance à l'intérieur du verre et le son sort par en haut** "(5), "**cela fait
une caisse de résonance** "(IUT), L6303) L11117 "**car le couteau est en métal et le
bol en verre, donc cela résonne** "

xiv.
autre

6.
comportement objet/matière

i.
matériau vibre("vibration du verre et du fer qui sont en contact"(IUT) "vibration du
verre"(IUT))

ii.
matériau actant (autre action que vibrer)

iii.
tremble

iv.
résonne ("c'est parce que le verre résonne", "le verre résonne") ("la résonance du
verre"(5))

v.
amplifie (L6303)

vi.
bouge("le bruit que la table fait en bougeant"(5))

vii.
autre

7.
phénomène (y compris vibration) confiné à l'objet

i.
vibration dans ou sur l'objet

ii.
vibration (ou résonance), amplifiée dans caisse de résonance ("**le bruit résonne dans le
verre donc on entend même quand on frappe doucement** ", "résonance dans le
bois(IUT)")

iii.
se disperse dans ou sur

-
- iv.
se propage dans ou sur ("*la son se propage dans le verre "(IUT)) (" la vibration créée par le son se propage sur toute la surface et on l'entend "(IUT))*)
8.
ombinaison Source / trajet (part de la source)
- i.
vibration de tout ou partie de la source + transfert (à l'air) d'une entité à partir de la source (L4107 : "quand on frappe cela fait vibrer et le bol émet un son")
- ii.
vibration de tout ou partie de la source + conséquence sur particules/ molécules (de l'air)
- iii.
Phénomène ou comportement de tout ou partie de l'émetteur (y compris vibration) + mise en vibration de l'air(ou "fait vibrer l'air".....)
- iv.
Phénomène ou comportement de tout ou partie de l'émetteur (y compris vibration) + mise en vibration des particules/molécules
- v.
choc + transfert (choc + onde de choc)(**"choc couteau-verre □ vibrations qui émettent un son "(IUT)) ("il y a contact entre deux matériaux, des vibrations sonores se propagent obligatoirement "(IUT))**)
- vi.
résonance + transfert
- vii.
phénomène autre que vibration + transfert d'une entité (y compris son) autre que vibration
9.
Combinaison trajet /récepteur (L10201 : "Il y a la propagation des ondes dans l'air qui nous parviens à l'oreille")
10.
Combinaison source / récepteur
11.
Chaîne complète (L4108 : "lorsqu'on frappe, on fait vibrer (plus ou moins) ce dernier. La vibration va se propager dans l'air pour arriver jusqu'à l'oreille")
12.
Phénomène seul (pas d'acteur)
- i.
vibration (sans précision) (**"des vibration "(5), "les vibrations du son provoquent un**

bruit "(TF11)

- ii.
résonance (sans précision) (sans notification de l'acteur : il y a une résonance ou ça résonne) ("**une résonance faible (son aigu)**") (IUT))
- iii.
amplification
- iv.
autre phénomène physique (ex. électricité statique)
13.
c'est comme ça", "c'est normal", "je me suis jamais posé la question"

Question J

On a deux téléphones mobiles identiques enfermés chacun dans une boîte parfaitement fermée. Un téléphone est enfermé dans une boîte en carton, l'autre dans une boîte en fer (les deux boîtes ont des parois de la même épaisseur).

Lorsque le propriétaire du téléphone est proche des boîtes, va-t-il entendre quelque chose

· si le téléphone qui est dans la boîte en bois sonne

—

oui

—

non

—

je ne sais pas

· - si le téléphone qui est dans la boîte en fer sonne

—

oui

—

non

—

je ne sais pas

Si vous pensez qu'il peut entendre chaque téléphone, va-t-il entendre des sons différents ou identiques venant des deux boîtes ? Justifiez.

Si vous pensez qu'il y a un téléphone (ou les deux) qu'il ne peut pas entendre, justifiez.

Codage

Pour chaque ligne on code

- 1.OUI
- 2.NON
- 0.jnsp

| variable | JA | JB | JE | JMA | JMB | JSA | JSB | JL |
|------------|-------------------------|-------------------|-------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------|--------|
| descriptif | case
boite
carton | case
boite fer | Explication | propriété
intrinsèque
du carton | propriété
intrinsèque
du fer | son
carton | son fer | langue |
| exemple | 1 | 1 | | | 0 | | | |

On n'est pas sûr ici que les boîtes ne soient pas considérées comme faisant partie intégrante de l'objet source. Ainsi, le lien entre la catégorie 3.2 et le cadre conceptuel 2 "son hors source" est à nuancer (en particulier pour 3.2.4 (vibrer) et 3.2.5 (résonner).

| | |
|--|------|
| Pas d'info | 1. |
| pas d'explication | i. |
| je ne sais pas | ii. |
| paraphrase | iii. |
| inexploitable | iv. |
| description des sons seule | 2. |
| différents | i. |
| identiques | ii. |
| Trajet, transfert (description de quelque chose hors de la source) | 3. |

- | | |
|--|-------|
| propriétés des matériaux des boîtes seulement (codage JE2 obligatoire) | i. |
| son ne traverse pas | ii. |
| le son ne peut pas traverser, ne peut pas sortir, la boîte stoppe, bloque, arrête... | iii. |
| la boîte est étanche, imperméable, étanchéité | iv. |
| le matériau est étanche | v. |
| son rebondit sur la boîte | vi. |
| une entité traverse | vii. |
| le son peut traverser, la boîte laisse passer, échapper("le son passera de différentes façon entre le bois et le fer"(IUT)) (L6311 : "des sons différents car les deux matériaux laissent passe le son de manières différentes) | viii. |
| les ondes peuvent passer | ix. |
| les vibrations peuvent passer | x. |
| passage jusqu'aux oreilles | xi. |
| passage grâce à des trous | xii. |
| autre | xiii. |
| effet (sur le son) ou action propre du matériau | xiv. |
| absorbe ("le bois absorbe mieux les sons que le fer" (TF11), "fer et bois n'absorbent pas autant les sons" (TF11), "le fer absorbe les fréquences du téléphone " (TF11)) | xv. |
| étouffe, atténue | xvi. |
| change, déforme le son ou autre entité | xvii. |

| | |
|--|--------|
| vibre (activité propre) | xviii. |
| résonne (activité propre) | xix. |
| amplifie | xx. |
| action du son (ou autre entité) sur les boites | xxi. |
| son fait vibrer les matériaux (ou les boites) | xxii. |
| son fait résonner | xxiii. |
| ça dépend de la vitesse du son dans le matériau (laisse passer si vitesse grande) | xxiv. |
| autre | xxv. |
| Source ; propriété de l'émission | 4. |
| du fait de la source (tellement puissante qu'on entend) | i. |
| trop faible, pas assez fort, aigu... | ii. |
| émetteur non-visible | iii. |
| Disposition géométrique des boîtes et des acteurs | 5. |
| Autre | 6. |
| <u>Propriétés intrinsèque des matériaux (ou boites) (impliquée éventuellement dans une action) JMA,JMB</u> | |
| non décrit | 1. |
| matières différentes | 2. |
| dur / mou | 3. |

| | |
|-------------------|------|
| dur | i. |
| mou | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| rigide / flexible | 4. |
| rigide | i. |
| flexible, souple | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| solide/fragile | 5. |
| solide | i. |
| fragile | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| lourd / léger | 6. |
| lourd | i. |
| léger | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| dense | 7. |
| dense, compact | i. |
| | ii. |

| | |
|--|------|
| peu dense | |
| ça dépend de | iii. |
| épais/fin | 8. |
| épais | i. |
| fin | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| isolant ("car le bois est un isolant"(TF11)) | 9. |
| isolant | i. |
| non isolant | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| métallique / non métallique | 10. |
| métallique | i. |
| non métallique | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| hermétique, imperméable | 11. |
| hermétique, imperméable | i. |
| non | ii. |
| dépend de | iii. |

| | |
|--|------|
| façon de transmettre le son | 12. |
| transmet bien | i. |
| ne transmet pas bien | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| capacité à retenir la diffusion, le passage du son, à résister | 13. |
| retient bien | i. |
| ne retient pas bien | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| autre | 14. |
| <u>description du son (JSA et JSB)</u> | |
| non décrit | 1. |
| autre | 2. |
| faible / fort | 3. |
| faible ou moins fort | i. |
| fort ou plus fort | ii. |
| bref / long | 4. |
| bref/court ou plus | i. |
| long ou moins court | ii. |

| | |
|--------------------------|------|
| aigu / grave | 5. |
| | i. |
| aigu ou plus | |
| | ii. |
| grave | |
| | 6. |
| résonant / non résonant | |
| | i. |
| résonant ou plus | |
| | ii. |
| pas ou moins | |
| | iii. |
| plus ou moins | |
| | 7. |
| sourd | |
| | i. |
| sourd ou plus | |
| | ii. |
| pas ou moins | |
| | 8. |
| clair | |
| | i. |
| clair/net ou plus | |
| | ii. |
| pas ou moins (confus...) | |
| | 9. |
| métallique | |
| | i. |
| métallique ou plus | |
| | ii. |
| pas ou moins | |
| | 10. |
| étouffé, atténué | |

- étouffé, atténué ou plus i.
- pas ou moins ii.
- intensité 11.
- faible (petite) i.
- forte (grande) ou plus ii.
- amplitude 12.
- faible (petite) i.
- forte (grande) ou plus ii.

Question K

*On frappe avec la même force à deux portes, l'une en bois, l'autre en verre fer plutôt ?? .
Compare les deux sons qu'on entend alors.*

codage:

| variable | KBA | KBB | KFA | KFB | KL |
|------------|------|---|-----|--|----|
| descriptif | son | propriété
matérielle
ou action
du BOIS | son | propriété
matérielle
ou action
du FER | |
| | bois | | fer | | |

Propriété du son

- non mentionné 1.
- autre 2.
- faible / fort 3.

| | |
|---|------|
| faible (ou moins fort) | i. |
| fort (ou plus fort) | ii. |
| indifférencié (plus ou moins fort/faible) | iii. |
| court/long | 4. |
| court, sec | i. |
| long | ii. |
| indifférencié (plus ou moins court/long) | iii. |
| aigu/grave | 5. |
| aigu (ou plus aigu ou moins grave...) | i. |
| grave (ou plus grave ou moins aigu...) | ii. |
| indifférencié (plus ou moins aigu/grave) | iii. |
| résonnant / non résonnant | 6. |
| plus résonnant ou résonne | i. |
| moins résonnant | ii. |
| indifférencié | iii. |
| mate, sourd | 7. |
| plus | i. |
| | ii. |

| | |
|-------------------------------|------|
| moins | |
| indifférencié | iii. |
| clair, limpide, net, cinglant | 8. |
| plus | i. |
| moins | ii. |
| indifférencié | iii. |
| métallique | 9. |
| plus | i. |
| moins | ii. |
| indifférencié | iii. |
| étouffé | 10. |
| plus | i. |
| moins | ii. |
| indifférencié | iii. |
| creux/plein | 11. |
| creux | i. |
| plein | ii. |
| indifférencié | iii. |

| | |
|--|------|
| intensité | 12. |
| faible (petite) | i. |
| forte (grande) ou plus | ii. |
| amplitude | 13. |
| faible (petite) | i. |
| forte (grande) ou plus | ii. |
| Identiques (KFA=KBA=1) | 14. |
| différents (sans description de la différence) | 15. |
| propriété matérielle ou action | |
| non évoquée | 1. |
| le matériau absorbe | 2. |
| dur / mou | 3. |
| dur | i. |
| mou | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| rigide / flexible | 4. |
| rigide | i. |
| flexible, souple | ii. |

| | |
|----------------|------|
| ça dépend de | iii. |
| solide/fragile | 5. |
| solide | i. |
| fragile | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| lourd / léger | 6. |
| lourd | i. |
| léger | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| dense | 7. |
| dense, compact | i. |
| peu dense | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| épais/fin | 8. |
| épais | i. |
| fin | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| | 9. |

| | |
|---------------------------------|------|
| Capacité à vibrer | |
| vibre beaucoup, facilement | i. |
| vibre peu ou pas, difficilement | ii. |
| ça dépend | iii. |
| | 10. |
| le matériau résonne | |
| bien, beaucoup | i. |
| peu, difficilement | ii. |
| ça dépend de | iii. |
| | 11. |
| le matériau claque | |
| autre | 12. |

Question L

Vous entendez la sirène d'une ambulance qui est à l'arrêt. Si l'ambulance se rapproche maintenant rapidement de vous, vous entendez le son de la sirène plus fort et plus aigu. Pourquoi le son est-il plus aigu quand l'ambulance se rapproche ?

| variable | LA | LL |
|------------|-------------|----|
| descriptif | explication | |

Codage LA

| | |
|-------------------|-----|
| Pas d'info | 1. |
| | i. |
| pas d'explication | |
| | ii. |
| "je ne sais pas" | |

| | |
|--|-------|
| paraphrase | iii. |
| inexploitable | iv. |
| Perception | 2. |
| parce que c'est plus fort | i. |
| Désaccord avec l'observation (négation du fait donné) | ii. |
| pas plus aigu | iii. |
| pas plus fort | iv. |
| ni plus aigu ni plus fort | v. |
| plus fort mais pas plus aigu | vi. |
| illusion auditive (L2102 : "car plus l'amplitude augmente plus le son est fort et l'oreille croit entendre les sons plus aigus" ; L2126 : "Lorsque le son est plus aigu ceci est lié à la fréquence mais ceci a plutôt à voir à une impression") | vii. |
| parce que la fréquence est plus grande | viii. |
| parce que l'amplitude est plus grande | ix. |
| parce que la fréquence est plus petite | x. |
| parce que l'amplitude est plus petite (ou varie) | xi. |
| on entend comme ça du fait de notre oreille | xii. |
| De loin on entend mieux les graves que les aigus | xiii. |
| Trajet | 3. |

-
- i.
 - Reformulation de la situation : changement de distance (ou "se rapproche...") seulement
(*car l'ambulance se rapproche*)
 - ii.
 - changement de distance (ou rapprochement, ou diminution du milieu à traverser)
 - iii.
 - =>plus fort
 - iv.
 - =>plus fort => plus aigu
 - v.
 - =>plus aigu
 - vi.
 - ==> changement d'une propriété liée au niveau sonore (amplitude, puissance) (L2123 :
"*car l'amplitude s'agrandit plus on se rapproche. Elle s'atténue avec la distance*")
 - vii.
 - =>plus net, plus pur, mieux perçu, on entend davantage le son "vrai"
 - viii.
 - =>moins d'obstacle, de résistance
 - ix.
 - relation distance à parcourir - caractère aigu/grave (ou propriété liée) (L2112 : car on
est plus proche et donc la période change et la fréquence est plus grande)
 - x.
 - relation facilité de propagation - caractère aigu/grave (ou propriété liée)(L2103 : car les
sons graves se propagent mieux que les sons aigus)
 - xi.
 - changement d'une des propriétés du son en tant qu'objet physique, en particulier
déformation du son (ex. le son se tasse) (L2119 : "car lorsque l'on est loin le son
parcourt une plus longue distance pour nous parvenir et se déforme dans l'air", L2109 :
les vibrations viennent plus rapidement, le son est moins dilaté dans l'air ; L2104 : cela
est dû au timbre)
 - xii.
 - relation distance à parcourir - vitesse du son
 - xiii.
 - lié au temps de parcourt qui diminue (plus prêt, on le perçoit plus vite) (L10219ap :
parce que l'ambulance se rapprochant de nous le son arrive plus vite.)
 - xiv.
 - onde sonore plus petite ou longueur d'onde plus petite
 - xv.
 - point de vue micro ou évocation des compressions qui se rapprochent
-

| | |
|--|------|
| relation vitesse – caractère aigu/grave | xvi. |
| Source | 4. |
| objet "ambulance" responsable (ce ne serait pas pareil avec une autre source) | i. |
| l'ambulance est en déplacement (sans relation apparente avec la distance entre émetteur et récepteur) (éventuellement invocation d'une propriété du déplacement) | ii. |
| Autre | 5. |
| évocation de l'effet Doppler | i. |
| autre | ii. |

Question M

| | |
|---|------|
| Cochez une des 5 cases : | 1. |
| la vitesse du son est plus grande que la vitesse de la lumière | i. |
| la vitesse du son est plus petite que la vitesse de la lumière | ii. |
| la vitesse du son est égale à la vitesse de la lumière | iii. |
| ça n'a pas de sens de parler de la vitesse du son | iv. |
| Je ne sais pas | v. |
| <i>Si vous avez coché une des trois premières cases, à quelle vitesse va à peu près le son dans l'air ? . .</i> | |
| Quelle que soit la case que vous avez cochée, donnez un exemple pratique qui puisse illustrer votre réponse | 1. |

Codage

| variable | MA | MB | MC |
|------------|----------------|-------------|----------------|
| descriptif | réponse cochée | explication | exemple choisi |

MB :

1. Pas d'info
- i. pas d'explication
- ii. "je ne sais pas"
- iii. paraphrase
- iv. réponse inexploitable
2. **exemple non déterminant (potentiellement)** (L1008ap "on voit bien que lorsqu'on allume la lumière c'est très rapide")
3. **exemple potentiellement approprié**
 - i. avec observation correcte et raisonnement non-valide
 - ii. avec mauvaise observation et raisonnement valide
 - iii. avec observation correcte et raisonnement valide
 - iv. non argumenté
 - v. instantanéité des perceptions visuelles et auditives due à une distance trop petite
4. connaissance encyclopédique
 - i. valeurs et unités 1. Une des deux valeurs 2. Les deux
 - ii. pas d'exemple, affirmation sans justification

- exemples " technologiques " (l'observation est issue d'un artefact de cette technologie) 5.
- retard à l'allumage d'un émetteur radio électrique i.
- situation dans laquelle un signal sonore est transmis par un support électromagnétique (téléphone par exemple) ii.
- ordre théorique 6.
- évocation (L10219ap : "on parle d'années lumières pour les planètes ce qui montre que c'est une grande mesure alors que la vitesse du son est utilisé sur des distances moins grandes.") i.
- justification ii.
- MC
- Aucun de la liste 1.
- Orage. éclairs 2.
- Echo 3.
- Feux d'artifice / Canon / départ d'une course 4.
- Avion / mur du son 5.
- Instrument de communication par ondes électromagnétiques. 6.
- autre 7.

Question N

Donnez une condition obligatoire pour faire un son.

Codage

| variable | NA | NL |
|------------|---------|----|
| descriptif | réponse | |
| exemple | 3.1. | |

on privilégie la vibration par rapport au milieu de propagation.

| | |
|--|------|
| Pas d'info | 1. |
| pas de réponse | i. |
| "je ne sais pas" | ii. |
| paraphrase | iii. |
| réponse inexploitable | iv. |
| Perception | 2. |
| il faut entendre quelque chose, il faut une personne pour entendre, un tympan... | i. |
| paraphrase du type "il faut qu'il y ait du bruit" | ii. |
| condition "milieu matériel", évoquant le trajet du son | 3. |
| nécessité d'un milieu | i. |
| avoir de l'air | ii. |
| avoir un gaz | iii. |
| un milieu matériel, un milieu de propagation, autre chose que du vide | iv. |
| vibration(s) du (dans) milieu (ou mouvement, déplacement du milieu) | v. |
| ondes (hors source) | vi. |

| | |
|--|-------|
| il faut qu'il y ait <u>propagation</u> (en tant que phénomène nécessaire) dans air ou milieu | vii. |
| <u>point de vue micro</u> | viii. |
| il faut des particules ou des molécules | ix. |
| il faut des particules (ou mol.) en vibration ou en mouvement | x. |
| condition sur "source" | 4. |
| deux objets (ou un seul) | i. |
| en interaction de contact | ii. |
| en interaction à distance | iii. |
| en mouvement | iv. |
| sans préciser | v. |
| un émetteur | vi. |
| une voix | vii. |
| précis (type haut-parleur, instrument) | viii. |
| en général (ou source) ou « émetteur » sans préciser | ix. |
| un mouvement | x. |
| une vibration (privilegiée p/r à mouvement si les deux sont cités) | xi. |
| des vibrations | xii. |
| caisse de résonance ou mécanisme amplificateur | xiii. |

| | |
|--|------|
| fournir de l'énergie | xiv. |
| condition combinée | 5. |
| vibration(s) + milieu de propagation | i. |
| un émetteur + un récepteur | ii. |
| un émetteur + un milieu de propagation | iii. |
| un milieu de propagation + un récepteur | iv. |
| un émetteur + un milieu de propagation + et un récepteur | v. |
| autre | 6. |
| Il n'y a pas de condition | i. |
| il faut un bruit | ii. |
| autre | iii. |

Question O

• → *Quand on crie face à un mur assez éloigné, quelques instants après on entend un écho. On fait un premier essai en disant "bh" normalement.*

1. Si on crie "oh" plus fort, perçoit-on l'écho
 –
 plus rapidement ☐ oui ☐ non ☐ ne sais pas
 –
 pendant plus longtemps ☐ oui ☐ non ☐ ne sais pas. Expliquez pourquoi
2. Si on crie "oh" avec une voix plus aiguë, perçoit-on l'écho

—
plus rapidement ☐ oui ☐ non ☐ ne sais pas

—
pendant plus longtemps ☐ oui ☐ non ☐ ne sais pas. Expliquez pourquoi

| variable | OAR | OAL | OARE | OALE | OBR | OBL | OBRE | OBLE |
|------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| descriptif | case cochée
Plus rapide | case cochée
plus long | Explication plus rapidement | Explication plus long | case cochée
Plus rapide | case cochée
plus long | Explication plus rapidement | Explication plus long |
| | plus fort | | | | plus aigu | | | |

- 1.OUI
- 2.NON
- 3.je ne sais pas

Codage de l'explication (pour "plus rapidement" et pour "plus longtemps")

On code avec la même grille toutes les explications données.

Pour chaque case cochée, on code une explication, même si elle n'existe pas.

- | | |
|---------------------------|------|
| Pas d'info | 1. |
| | |
| pas d'explication | i. |
| | |
| "je ne sais pas" | ii. |
| | |
| paraphrase | iii. |
| | |
| réponse inexploitable | iv. |
| | |
| Perception | 2. |
| | |
| on entend juste plus fort | i. |
| | |
| on entend juste plus aigu | ii. |
| | |
| | iii. |

| | |
|--|------|
| on entend mieux | |
| association plus aigu/plus fort | iv. |
| association plus aigu/moins fort | v. |
| association plus aigu / plus court | vi. |
| le son perçu est déformé, transformé | vii. |
| Trajet | 3. |
| vitesse inchangée | i. |
| vitesse plus grande | ii. |
| vitesse plus grande après rebond | iii. |
| vitesse plus petite | iv. |
| écho multiple (plusieurs rebonds donc durée plus grande) | v. |
| autre | vi. |
| 0.Source (on émet forcément pendant plus longtemps) | 4. |
| Source + trajet | 5. |
| vitesse (ou durée) indépendante de | i. |
| l'amplitude, l'intensité, la force | ii. |
| la façon dont on crie | iii. |
| la fréquence, le caractère aigu/grave, la tonalité | iv. |
| | v. |

| | |
|--|-------|
| vitesse (ou durée) dépendante de | |
| l'amplitude, l'intensité, la force | vi. |
| la façon dont on crie | vii. |
| la fréquence, le caractère aigu/grave, la tonalité | viii. |
| plus fort, onde plus forte, plus intense => met plus de temps pour s'épuiser | ix. |
| plus fort, onde plus forte, plus intense => rebond plus fort, plus violent | x. |
| 0.Source + réception L'écho = reproduction de ce qu'on a dit (donc inchangé) : on entend ce qu'on émet | 6. |
| expérience vécue (ou encyclopédisme), argument d'autorité | 7. |
| Autre | 8. |
| vibration(s) | i. |
| résonance | ii. |
| Interprétation de type microscopique | iii. |

Question P

Partie a :Cochez les milieux dans lesquels le son peut se déplacer :

- .
l'eau
- .
le bois
- .
l'air
- .

le béton

le polystyrène

le vide

l'acier

un gaz quelconque

Justifiez rapidement

Ce qui importe dans la première partie de la question est moins l'effectif cumulé de chaque milieu que les ensembles (regroupant les milieux de propagation possibles) choisis par chaque individu. On peut ainsi espérer lire un ou des critères de séparation entre les milieux possibles et les autres. Ces critères peuvent d'ailleurs être expliciter dans la justification demandée.

Exemple : si polystyrène, carton et bois sont dans la liste des milieux possibles mais ni acier ni béton alors ce peut être une propriété ressemblant à la dureté ou la rigidité qui permet d'exclure un candidat à la propagation.

Pour catégoriser les milieux selon certains critères qui peuvent être déterminant, on peut essayer d'imaginer le tableau suivant, avec des séparations cependant floues dans certains cas (plus en tous les cas que ne le laisse imaginer le tableau) :

| | vide | air | autre gaz | eau | polystyrène | bois | acier | béton |
|------------------------------|-------------|------------|------------------|------------|--------------------|-------------|--------------|--------------|
| phase | | | | | | | | |
| dureté | X | | | | | | | |
| rigidité | | | | | | | | |
| densité | X | | < | > | | < | < | < |
| élasticité
(sens courant) | X | X | X | X | | | | |
| isolant thermique | parfait | bon | bon | mauvais | bon | bon | mauvais | |

En conséquence on peut proposer le codage suivant :

pour chaque milieu, on code 0 ou 1 selon qu'il est choisi ou non. On peut aussi tester si quelques regroupements apparaissent pertinents parmi les 64 ($=2^6$) possibles lorsqu'on ne considère pas le vide et l'air (sur les 6 éléments restants). On choisit ici de privilégier 15 de ces arrangements, qui, c'est une hypothèse, nous permettront de couvrir quasiment la totalité des réponses.

- | | |
|---|-----|
| autre gaz (seulement dans les gaz) | 1. |
| autre gaz + eau (seulement dans les non-solides) | 2. |
| eau | 3. |
| autre gaz + eau + polystyrène (ne se propage pas quand c'est dur et/ou dense) | 4. |
| eau + polystyrène | 5. |
| autre gaz + eau + polystyrène + bois (ne se propage pas quand c'est rigide) | 6. |
| eau + polystyrène + bois | 7. |
| autre gaz + polystyrène (ne se propage pas quand c'est dense/lourd) | 8. |
| polystyrène | 9. |
| autre gaz + polystyrène + eau + bois (ne se propage pas si c'est trop lourd) | 10. |
| polystyrène + eau + bois | 11. |
| autre gaz + polystyrène + bois (isolant thermique) | 12. |
| polystyrène + bois (isolant thermique) | 13. |
| autre gaz + eau + bois + acier + béton (se propage si c'est assez lourd/dense ou il ne faut pas que ce soit un isolant thermique) | 14. |
| eau + bois + acier + béton | 15. |
| autre gaz + eau + bois + acier + béton + polystyrène (tous) | 16. |

| variable | Peau | Pbois | Pair | Pbéton | Ppoly | Pvide | Pacier | Pgaz | PB |
|------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| descriptif | coché
ou non | | | | | | | | explication |
| exemple | 0 ou 1 | 0 ou 1 | 0 ou 1 | 0 ou 1 | 0 ou 1 | 0 ou 1 | 0 ou 1 | 0 ou 1 | |

Codage PB

| | |
|---|------|
| Pas d'info | 1. |
| pas d'explication | i. |
| "je ne sais pas" | ii. |
| paraphrase | iii. |
| réponse inexploitable | iv. |
| réponse au hasard | v. |
| 0 dans vide, il n'y a rien (pas même son) | 2. |
| nécessité de matière | 3. |
| seule | i. |
| pour avoir des vibrations | ii. |
| État de la matière | 4. |
| seul | i. |
| différence (liquide/gaz)-solide | ii. |
| milieu doit laisser passer | 5. |
| doit laisser passer (ne pas réfléchir le son) | i. |

| | |
|---|------|
| doit laisser passer l'air | ii. |
| présence de trou, milieu "perméable" | iii. |
| 0 capacité à résister, à absorber | 6. |
| 0 dureté | 7. |
| 0 rigidité | 8. |
| densité | 9. |
| structure compacte | i. |
| densité/poids (lourd) | ii. |
| sens indéterminable | iii. |
| isolant / isolation | 10. |
| seul | i. |
| thermique | ii. |
| phonique | iii. |
| 0 encyclopédique, argument d'autorité | 11. |
| 0 réalisation virtuelle de l'expérience | 12. |
| 0 point de vue microscopique | 13. |
| 0 autre | 14. |

Partie b : dans quel milieu se déplace-t-il le plus rapidement, le moins

rapidement ? Justifiez.Codage

Deux cases : la première pour le milieu dans lequel ça va le plus vite la deuxième pour le milieu dans lequel ça va le moins vite.

- | | |
|----------------|----|
| aucune réponse | 1. |
| vide | 2. |
| air | 3. |
| autre gaz | 4. |
| eau | 5. |
| polystyrène | 6. |
| bois | 7. |
| acier | 8. |
| béton | 9. |

| Variable | P _{rapide} | P _{lent} | PC |
|------------|---------------------------------------|--|----|
| descriptif | milieu dans lequel ça va le plus vite | milieu dans lequel ça va le moins vite | |
| exemple | 0 à 8 | 0 à 8 | |

- | | |
|-------------------|------|
| Pas d'info | 1. |
| pas d'explication | i. |
| "je ne sais pas" | ii. |
| paraphrase | iii. |

| | |
|---|------|
| réponse inexploitable | iv. |
| réponse au hasard | v. |
| 0 Capacité à laisser passer donc son va plus vite | 2. |
| 0 capacité à transmettre les vibrations | 3. |
| 0 capacité à résister, à absorber donc son va moins vite | 4. |
| 0 dureté (dur/mou) | 5. |
| 0 rigidité (rigide/flexible) | 6. |
| 0 densité (compact) | 7. |
| 0 poids (lourd) | 8. |
| 0 matériau "canalisant" (i.e. non gazeux en fait) donc ça va lus vite | 9. |
| 0 encyclopédique | 10. |
| valeurs de vitesse données | i. |
| autre | ii. |
| 0 réalisation virtuelle de l'expérience | 11. |
| point de vue microscopique | 12. |
| distance intermoléculaire | i. |
| vitesse des molécules | ii. |
| capacité des molécules à vibrer ou à bouger | iii. |

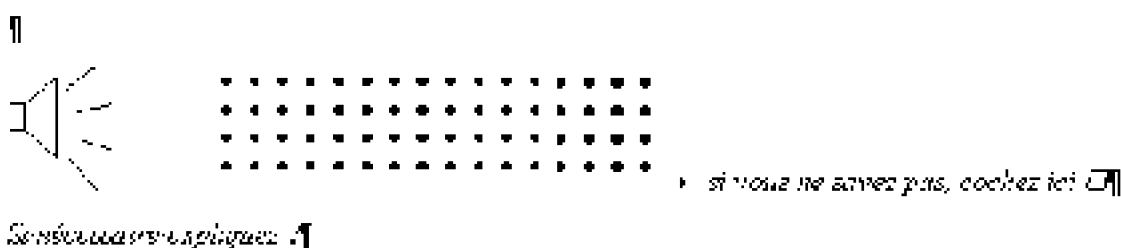
13.

0autre

Question Q

On suppose que, très schématiquement, quand il n'y a aucun son, les molécules qui composent l'air sont rangées comme ci-dessous (elles sont énormément grossies).

Puis si un haut-parleur émet un son dans l'air en permanence, décrivez ce qu'il se passe au niveau des molécules durant un temps assez long, en complétant ou refaisant le schéma ci-dessous :



Codage

Au cas où l'explication ne semble pas cohérente avec le schéma (ou du moins de l'éclaire pas du tout), si elle n'est pas claire, on privilégie le schéma. Par contre, dans les cas où le schéma est statique alors que l'explication implique du dynamisme, on privilégie l'explication en langage naturel.

Pas d'info

1.

pas de réponse

i.

"je ne sais pas"

ii.

réponse inexploitable

iii.

0 mise en désordre, se disperse, s'éparpillent

2.

déplacement de molécules (plutôt C2a)

3.

vers la droite (déplacement d'ensemble sans autre précision)

i.

déplacement vers la droite des particules qui sont dans l'axe du HP (L2101)

ii.

| | |
|---|------|
| déplacement vers la droite + chocs | iii. |
| molécules compressées vers la droite (les plus à droite ne bougent pas) | iv. |
| particularisation d'une molécule (ou de peu d'entre elles) qui va se déplacer | v. |
| les molécules bougent, se déplacent (sans schéma) | vi. |
| chocs (seul) | vii. |
| rayonnement , éparpillement (plutôt C2b) | 4. |
| déplacement vers la droite + tendance à <u>éparpillement</u> , expulsion vers l'extérieur | i. |
| déplacement /éparpillement sur le côté exclusivement(L2107) | ii. |
| 0 les molécules vibrent, ça vibre (sans schéma) | 5. |
| vibration à une dimension verticale | 6. |
| seule | i. |
| vibration + chocs (du type mécanisme de vibration de proche en proche) | ii. |
| vibration d'ensemble | iii. |
| vibration à une dimension horizontale | 7. |
| seule | i. |
| vibration + chocs (du type mécanisme de vibration de proche en proche) | ii. |
| vibration d'ensemble | iii. |
| | 8. |

| | |
|---|------|
| alternance de zones comprimées et dilatées | |
| schéma seul | i. |
| (schéma) + déplacement d'une perturbation ou du motif de proche en proche (en précisant éventuellement qu'il n'y a pas de déplacement de matière) | ii. |
| les molécules dessinent un autre motif que "compression/dilatation" | 9. |
| concentrique (type "front d'ondes") (plutôt C2b) | i. |
| radial (L2112) (plutôt C2b) | ii. |
| sinusoïdal | iii. |
| décalage alternatif des "colonnes" de particules (L2120) | iv. |
| semblent s'écarter pour laisser passer le son (L2122) | v. |
| se resserrent vers la fin | vi. |
| autre motif | vii. |
| 0 pas de mouvement de particules, le son passe à travers, le milieu est totalement passif | 10. |
| 0 Les molécules constituent un support d'une autre entité représentée qui passe de molécules en molécules | 11. |
| 0 il ne se passe rien | 12. |
| 0 changement du nombre de particules | 13. |
| il y a de moins en moins de particules | i. |
| il y a plus de particules | ii. |

14.

Les particules changent de taille

i.

deviennent plus petites

ii.

deviennent plus grande

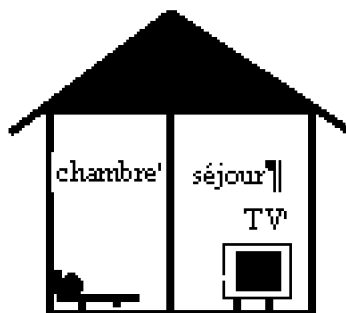
Question R

•→Le propriétaire d'une maison en construction voudrait faire un mur de 10 cm d'épaisseur pour séparer la chambre de ses enfants de la pièce où la télévision marchera souvent jusque tard le soir. Classez de votre point de vue les matériaux suivants du meilleur au moins bon pour fabriquer ce mur (pour un mur de 10 cm d'épaisseur).

Bois, béton, polystyrène, fer, laine de verre.

1(meilleur)2,3,4,5(moins bon)

Justifiez rapidement :



Codage

Il y 120 possibilités pour l'ordre.

| variable | RA1 | RA2 | RA3 | RA4 | RA5 | RB | RL |
|------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|----|
| descriptif | 1 ^{ère}
position | 2 ^e | 3 ^e | 4 ^e | 5 ^e | explication | |
| exemple | béton | fer | bois | polys. | laine | 4.4 | |

1 : bois ; 2 : béton ; 3 : polystyrène ; 4 : fer ; 5 : laine de verre.

Justification :

1.

| | |
|---|------|
| Pas d'info | |
| pas d'explication | i. |
| "je ne sais pas" | ii. |
| paraphrase | iii. |
| réponse inexploitable | iv. |
| réponse au hasard | v. |
| | 2. |
| Expérience issu de l'utilisation du matériau pour faire des murs ou pour mettre sur les murs | |
| | i. |
| évocation d'isolation/isoler seul explicite (" on met tels matériaux sur les murs pour isoler ") | |
| | ii. |
| évocation d'isolation /isoler implicite et liée en fait à l'isolation thermique (expérience, situation rencontrée du type "on met du polystyrène sur les murs ", idem laine de verre) | |
| | iii. |
| car ce matériau est utilisé pour faire des murs | |
| | iv. |
| absurdité de parois molles | |
| | 3. |
| Nature du son | |
| | i. |
| invisible | |
| | ii. |
| faible (par rapport aux matériaux solides par exemple) | |
| | iii. |
| comparaison dureté/force son et matériau | |
| | iv. |
| peut faire bouger les parois solides | |
| | 4. |
| Propriétés des matériaux | |

| | |
|--|-------|
| dureté | i. |
| rigidité | ii. |
| solidité | iii. |
| poids | iv. |
| densité (dense, compact...) | v. |
| épaisseur | vi. |
| isolant | vii. |
| vitesse du son (ou de propagation) dans le matériau | viii. |
| Capacité des matériaux à | 5. |
| résonner | i. |
| absorber | ii. |
| atténuer le son | iii. |
| être traversé, à laisser passer | iv. |
| être traversé, laisser passer en invoquant trous ou fentes | v. |
| assurer les joints | vi. |
| source, nature de l'émission (plutôt CC3) | 6. |
| forte | i. |
| différence selon grave et aigu | ii. |

7.

0 autre

Question S

- → *Lorsqu'on entend un son, il y a quelque chose qui vibre (un objet ou une partie d'un objet).*

A votre avis (cochez une des deux cases), si le son devient plus aigu, c'est qu'il s'est passé quelque chose :

entre ce qui vibre et l'oreille précisez alors ce qui a changé :

ou au niveau de la vibration précisez alors en quoi la vibration est modifiée :

On choisit ici de coder le changement différemment selon la case cochée.

Codage

| variable | SA | SB |
|------------|----------------|-------------|
| descriptif | réponse cochée | explication |
| exemple | 1 | 3 |

entre ce qui vibre et l'oreille

Pas d'info

1.

pas d'explication

i.

"je ne sais pas"

ii.

paraphrase

iii.

réponse inexploitable

iv.

Nouvelle description

2.

la fréquence

i.

ii.

| | |
|--|-------|
| la tonalité | |
| la hauteur | iii. |
| le timbre | iv. |
| le volume (ou lié) | v. |
| autre | vi. |
| Trajet / milieu | 3. |
| Changement de distance | i. |
| plus grande | ii. |
| plus petite | iii. |
| changement seul | iv. |
| Changement de milieu | v. |
| comportement des molécules | vi. |
| évocation de l'aller-retour des particules | vii. |
| autre | viii. |
| autre | ix. |
| 0 autre | 4. |
| <u>au niveau de la vibration</u> | |
| Pas d'info | 1. |
| | i. |

| | |
|---|------|
| pas d'explication | |
| "je ne sais pas" | ii. |
| paraphrase | iii. |
| réponse inexploitable | iv. |
| paramètre perceptif | 2. |
| hauteur | i. |
| intensité, volume, puissance | ii. |
| niveau (acoustique), décibels | iii. |
| force | iv. |
| autre | v. |
| Trajet | 3. |
| comportement des molécules | i. |
| la distance entre émetteur et récepteur | ii. |
| la vibration s'atténue | iii. |
| le son ne peut pas être modifié en se déplaçant | iv. |
| autre | v. |
| lié à émetteur / source | 4. |
| Quelque chose lié à la <u>hauteur</u> (et attribué à la source) (point de vue de la physique) | i. |

| | |
|--|-------|
| fréquence | ii. |
| vitesse (de la vibration) | iii. |
| rapidité (de la vibration) | iv. |
| autre | v. |
| Quelque chose lié au <u>volume</u> (et attribué à la source) (point de vue de la physique) | vi. |
| la force du coup, de la vibration | vii. |
| l'intensité | viii. |
| l'amplitude | ix. |
| autre | x. |
| <u>l'émetteur</u> lui-même | xi. |
| l'émetteur change (matériau, forme, instrument...) | xii. |
| on change la façon de jouer ou la note | xiii. |
| la voix est plus aigu | xiv. |
| homme/femme | xv. |
| autre | xvi. |
| 0 Autre | 5. |

Question T

- → On dit souvent qu'un son a trois caractéristiques : le niveau acoustique (fort/faible), la hauteur (aigu/grave) et le timbre (plus ou moins riche). Donnez un concept physique (ou

un paramètre physique), concernant la vibration sonore, qui correspond à chacune de ces trois propriétés.

| caractéristique du son: | niveau acoustique | hauteur | timbre |
|--|--|--|---|
| paramètre physique: | A1. de la vibration | A2 de la vibration | A3 de la vibration |
| Dites ensuite, en complétant chaque phrase, comment ce paramètre doit évoluer (augmenter ou diminuer par exemple) pour obtenir le résultat indiqué : | | | |
| | doit . . .B1 pour que le son soit plus fort | doit B2 pour que le son soit plus aigu | doit . . .B3 pour que le son soit plus riche |

Codage

A1, A2, A3

- | | |
|--|------|
| Pas d'info | 1. |
| vide | i. |
| "je ne sais pas" | ii. |
| | 2. |
| facteurs influençant plutôt le niveau acoustique (et pas la hauteur), du point de vue de la physique | |
| amplitude | i. |
| intensité | ii. |
| volume | iii. |
| puissance | iv. |
| niveau (acoustique) | v. |
| décibels | vi. |
| distance | vii. |

| | |
|--|-------|
| | viii. |
| force | |
| | ix. |
| U_m | |
| | 3. |
| facteur influençant la hauteur (et pas le niveau acoustique), du point de vue de la physique | |
| | i. |
| fréquence | |
| | ii. |
| vitesse | |
| | iii. |
| rapidité | |
| | iv. |
| période | |
| | v. |
| hauteur | |
| | vi. |
| tonalité | |
| | vii. |
| autre | |
| | 4. |
| facteur lié au timbre, ou autre | |
| | i. |
| timbre | |
| | ii. |
| forme | |
| | iii. |
| instrument (ou source) | |
| | iv. |
| résonance | |
| | v. |
| spectre | |
| | vi. |
| richesse | |
| | vii. |

longueur d'onde

viii.

autre

B1, B2, B3

1.

Pas d'info

i.

vide

ii.

"je ne sais pas"

2.

0 augmente (ou même idée)

3.

0 diminue (ou même idée)

4.

0 devenir plus complexe

5.

0 s'enrichir

6.

0 autre

annexes relatives à la partie D

7771-1 514

bioRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/2017.06.01.148401>; this version posted June 1, 2017. The copyright holder for this preprint (which was not certified by peer review) is the author/funder, who has granted bioRxiv a license to display the preprint in perpetuity. It is made available under aCC-BY-NC-ND 4.0 International license.

1. Les données ne sont pas pertinentes pour l'analyse. Elles ne sont pas pertinentes car elles ne sont pas pertinentes pour l'analyse.

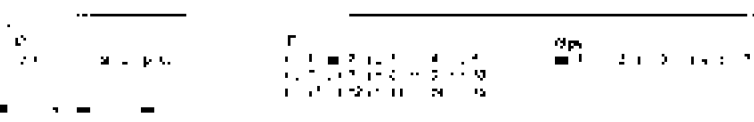
1. *Polyporus*, *Boletus*, *Cantharellus*, *Tricholoma* etc. (not *Hydnum* etc. etc.) 2. *Boletus*, *Cantharellus*, *Tricholoma* etc. etc. 3. *Boletus*, *Cantharellus*, *Tricholoma* etc. etc. 4. *Boletus*, *Cantharellus*, *Tricholoma* etc. etc.

2. *Before* is 0 or ∞ , an arbitrary time-step pair $(\Delta t, \Delta x)$ for which Δt is not too large and Δx is not too small (that is, Δt and Δx are both $\geq 10^{-3}$ and $\leq 10^{-1}$) is chosen and used.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 | 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 | 241 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | 247 | 248 | 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 | 261 | 262 | 263 | 264 | 265 | 266 | 267 | 268 | 269 | 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 | 281 | 282 | 283 | 284 | 285 | 286 | 287 | 288 | 289 | 290 | 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 | 301 | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 | 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 | 321 | 322 | 323 | 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 | 333 | 334 | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 | 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 | 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 | 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 | 375 | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 | 381 | 382 | 383 | 384 | 385 | 386 | 387 | 388 | 389 | 390 | 391 | 392 | 393 | 394 | 395 | 396 | 397 | 398 | 399 | 400 | 401 | 402 | 403 | 404 | 405 | 406 | 407 | 408 | 409 | 410 | 411 | 412 | 413 | 414 | 415 | 416 | 417 | 418 | 419 | 420 | 421 | 422 | 423 | 424 | 425 | 426 | 427 | 428 | 429 | 430 | 431 | 432 | 433 | 434 | 435 | 436 | 437 | 438 | 439 | 440 | 441 | 442 | 443 | 444 | 445 | 446 | 447 | 448 | 449 | 450 | 451 | 452 | 453 | 454 | 455 | 456 | 457 | 458 | 459 | 460 | 461 | 462 | 463 | 464 | 465 | 466 | 467 | 468 | 469 | 470 | 471 | 472 | 473 | 474 | 475 | 476 | 477 | 478 | 479 | 480 | 481 | 482 | 483 | 484 | 485 | 486 | 487 | 488 | 489 | 490 | 491 | 492 | 493 | 494 | 495 | 496 | 497 | 498 | 499 | 500 | 501 | 502 | 503 | 504 | 505 | 506 | 507 | 508 | 509 | 510 | 511 | 512 | 513 | 514 | 515 | 516 | 517 | 518 | 519 | 520 | 521 | 522 | 523 | 524 | 525 | 526 | 527 | 528 | 529 | 530 | 531 | 532 | 533 | 534 | 535 | 536 | 537 | 538 | 539 | 540 | 541 | 542 | 543 | 544 | 545 | 546 | 547 | 548 | 549 | 550 | 551 | 552 | 553 | 554 | 555 | 556 | 557 | 558 | 559 | 560 | 561 | 562 | 563 | 564 | 565 | 566 | 567 | 568 | 569 | 570 | 571 | 572 | 573 | 574 | 575 | 576 | 577 | 578 | 579 | 580 | 581 | 582 | 583 | 584 | 585 | 586 | 587 | 588 | 589 | 590 | 591 | 592 | 593 | 594 | 595 | 596 | 597 | 598 | 599 | 600 | 601 | 602 | 603 | 604 | 605 | 606 | 607 | 608 | 609 | 610 | 611 | 612 | 613 | 614 | 615 | 616 | 617 | 618 | 619 | 620 | 621 | 622 | 623 | 624 | 625 | 626 | 627 | 628 | 629 | 630 | 631 | 632 | 633 | 634 | 635 | 636 | 637 | 638 | 639 | 640 | 641 | 642 | 643 | 644 | 645 | 646 | 647 | 648 | 649 | 650 | 651 | 652 | 653 | 654 | 655 | 656 | 657 | 658 | 659 | 660 | 661 | 662 | 663 | 664 | 665 | 666 | 667 | 668 | 669 | 670 | 671 | 672 | 673 | 674 | 675 | 676 | 677 | 678 | 679 | 680 | 681 | 682 | 683 | 684 | 685 | 686 | 687 | 688 | 689 | 690 | 691 | 692 | 693 | 694 | 695 | 696 | 697 | 698 | 699 | 700 | 701 | 702 | 703 | 704 | 705 | 706 | 707 | 708 | 709 | 710 | 711 | 712 | 713 | 714 | 715 | 716 | 717 | 718 | 719 | 720 | 721 | 722 | 723 | 724 | 725 | 726 | 727 | 728 | 729 | 730 | 731 | 732 | 733 | 734 | 735 | 736 | 737 | 738 | 739 | 740 | 741 | 742 | 743 | 744 | 745 | 746 | 747 | 748 | 749 | 750 | 751 | 752 | 753 | 754 | 755 | 756 | 757 | 758 | 759 | 760 | 761 | 762 | 763 | 764 | 765 | 766 | 767 | 768 | 769 | 770 | 771 | 772 | 773 | 774 | 775 | 776 | 777 | 778 | 779 | 780 | 781 | 782 | 783 | 784 | 785 | 786 | 787 | 788 | 789 | 790 | 791 | 792 | 793 | 794 | 795 | 796 | 797 | 798 | 799 | 800 | 801 | 802 | 803 | 804 | 805 | 806 | 807 | 808 | 809 | 810 | 811 | 812 | 813 | 814 | 815 | 816 | 817 | 818 | 819 | 820 | 821 | 822 | 823 | 824 | 825 | 826 | 827 | 828 | 829 | 830 | 831 | 832 | 833 | 834 | 835 | 836 | 837 | 838 | 839 | 840 | 841 | 842 | 843 | 844 | 845 | 846 | 847 | 848 | 849 | 850 | 851 | 852 | 853 | 854 | 855 | 856 | 857 | 858 | 859 | 860 | 861 | 862 | 863 | 864 | 865 | 866 | 867 | 868 | 869 | 870 | 871 | 872 | 873 | 874 | 875 | 876 | 877 | 878 | 879 | 880 | 881 | 882 | 883 | 884 | 885 | 886 | 887 | 888 | 889 | 890 | 891 | 892 | 893 | 894 | 895 | 896 | 897 | 898 | 899 | 900 | 901 | 902 | 903 | 904 | 905 | 906 | 907 | 908 | 909 | 910 | 911 | 912 | 913 | 914 | 915 | 916 | 917 | 918 | 919 | 920 | 921 | 922 | 923 | 924 | 925 | 926 | 927 | 928 | 929 | 930 | 931 | 932 | 933 | 934 | 935 | 936 | 937 | 938 | 939 | 940 | 941 | 942 | 943 | 944 | 945 | 946 | 947 | 948 | 949 | 950 | 951 | 952 | 953 | 954 | 955 | 956 | 957 | 958 | 959 | 960 | 961 | 962 | 963 | 964 | 965 | 966 | 967 | 968 | 969 | 970 | 971 | 972 | 973 | 974 | 975 | 976 | 977 | 978 | 979 | 980 | 981 | 982 | 983 | 984 | 985 | 986 | 987 | 988 | 989 | 990 | 991 | 992 | 993 | 994 | 995 | 996 | 997 | 998 | 999 | 1000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|
| 1. The following is a list of the most common types of... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1.

—



INTERVIEW

1. Quel était l'objectif principal de votre recherche ?
2. Il existait une littérature existante dans le domaine que vous avez pu exploiter pour mener à bien votre recherche ?
3. Quel était le but principal de votre recherche ?
4. Il y avait une certaine limite à l'étendue de votre recherche ?
5. Quel était le principal résultat de votre recherche ?

1. Quel était le principal objectif de votre recherche ?

2. Quel était le principal résultat de votre recherche ?

3. Quel était le principal résultat de votre recherche ?

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1. Quel était le principal objectif de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 2. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 3. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 4. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 5. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 6. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 7. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |

4. Quel était le principal résultat de votre recherche ?

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1. Quel était le principal objectif de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 2. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 3. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 4. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 5. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 6. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |
| 7. Quel était le principal résultat de votre recherche ? | | | | | | | | | | |

| G | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

WREQUIN, B.C.F.

Downloaded from <http://www.sagepub.com> at 10/21/2009 15:00:00

1. La mayoría de las células de la corteza cerebral son multipolares piramidales.
2. La corteza de la corteza cerebral es la corteza de la corteza cerebral.
3. La corteza de la corteza cerebral es la corteza de la corteza cerebral.
4. La corteza de la corteza cerebral es la corteza de la corteza cerebral.
5. La corteza de la corteza cerebral es la corteza de la corteza cerebral.

[†] The authors are grateful to Dr. J. H. Goldstein for his critical reading of the manuscript.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

¹ *Journal of Management Studies*, 2003, 40(1), 11–27.

What is the purpose of the following text?

1. Identify the problem and the objectives of the research

a. $\lambda = 0.5$ m, $\nu = 6.0 \times 10^{14}$ s⁻¹, $E = 3.0 \times 10^{-19}$ J, $h\nu = 3.98 \times 10^{-19}$ J, $E < h\nu$, no emission.

Une téléréc.

[illegible]

!

4

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 |

3.

3. 4. 1.

VIBRER, VIBRATION

- Le mot **vibrer** nous est donc devenu familier.
1. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement.
 2. Le mot **vibrer** nous est donc familier.
 3. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement.
 4. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement.

Le mot **vibrer** nous est donc familier. Le mot **vibrer** nous est donc familier. Le mot **vibrer** nous est donc familier.

Le mot **vibrer** nous est donc familier. Le mot **vibrer** nous est donc familier. Le mot **vibrer** nous est donc familier.

Le mot **vibrer** nous est donc familier. Le mot **vibrer** nous est donc familier. Le mot **vibrer** nous est donc familier.

Le mot **vibrer** nous est donc familier. Le mot **vibrer** nous est donc familier. Le mot **vibrer** nous est donc familier.

Le mot **vibrer** nous est donc familier.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2. Le mot vibrer nous est donc familier. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 8. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2. Le mot vibrer nous est donc familier. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 8. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10. Pour qu'on puisse parler d'un objet qui vibre, il faut qu'il soit en mouvement. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Le mot **vibrer** nous est donc familier. Le mot **vibrer** nous est donc familier. Le mot **vibrer** nous est donc familier.

LETTER.

... and the ... of ...

1. l'effort d'adaptation des entreprises à la mondialisation;
2. l'effort de réduction des inégalités de développement;
3. l'effort de réduction des inégalités de répartition des richesses;
4. l'effort de réduction des inégalités de répartition des richesses;
5. l'effort de réduction des inégalités de répartition des richesses;
6. l'effort de réduction des inégalités de répartition des richesses;

^a The polymerization was carried out at 100°C for 1 h. The initiator "AIBN" and the different monomers in the polymerization were used in the following molar ratios: 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4, 1 : 5.

© 2006 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. Printed in the United States of America. This book is a registered trademark of The McGraw-Hill Companies, Inc. All other trademarks are the property of their respective owners. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage or retrieval system, without prior written permission from The McGraw-Hill Companies, Inc. For more information, contact The McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020-1345.

3. *Order* $\mathcal{O}(n)$ and $\mathcal{O}(n^2)$ are both $\mathcal{O}(n^3)$ for large n . However, n^3 is not $\mathcal{O}(n^2)$ for large n . Again, the words "for large n " are important. One could in theory claim that n^3 is $\mathcal{O}(n^2)$ for small values of n .

Figure 4

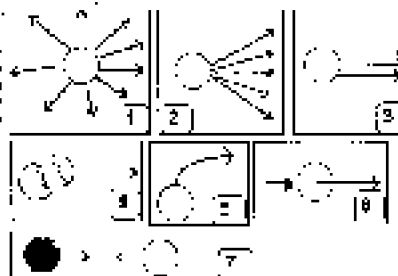
1. What is the purpose of the research?
2. What is the research design?
3. What is the research method?
4. What is the research instrument?
5. What is the research data?
6. What is the research conclusion?

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100. 101. 102. 103. 104. 105. 106. 107. 108. 109. 110. 111. 112. 113. 114. 115. 116. 117. 118. 119. 120. 121. 122. 123. 124. 125. 126. 127. 128. 129. 130. 131. 132. 133. 134. 135. 136. 137. 138. 139. 140. 141. 142. 143. 144. 145. 146. 147. 148. 149. 150. 151. 152. 153. 154. 155. 156. 157. 158. 159. 160. 161. 162. 163. 164. 165. 166. 167. 168. 169. 170. 171. 172. 173. 174. 175. 176. 177. 178. 179. 180. 181. 182. 183. 184. 185. 186. 187. 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 197. 198. 199. 200. 201. 202. 203. 204. 205. 206. 207. 208. 209. 210. 211. 212. 213. 214. 215. 216. 217. 218. 219. 220. 221. 222. 223. 224. 225. 226. 227. 228. 229. 230. 231. 232. 233. 234. 235. 236. 237. 238. 239. 240. 241. 242. 243. 244. 245. 246. 247. 248. 249. 250. 251. 252. 253. 254. 255. 256. 257. 258. 259. 260. 261. 262. 263. 264. 265. 266. 267. 268. 269. 270. 271. 272. 273. 274. 275. 276. 277. 278. 279. 280. 281. 282. 283. 284. 285. 286. 287. 288. 289. 290. 291. 292. 293. 294. 295. 296. 297. 298. 299. 300. 301. 302. 303. 304. 305. 306. 307. 308. 309. 310. 311. 312. 313. 314. 315. 316. 317. 318. 319. 320. 321. 322. 323. 324. 325. 326. 327. 328. 329. 330. 331. 332. 333. 334. 335. 336. 337. 338. 339. 340. 341. 342. 343. 344. 345. 346. 347. 348. 349. 350. 351. 352. 353. 354. 355. 356. 357. 358. 359. 360. 361. 362. 363. 364. 365. 366. 367. 368. 369. 370. 371. 372. 373. 374. 375. 376. 377. 378. 379. 380. 381. 382. 383. 384. 385. 386. 387. 388. 389. 390. 391. 392. 393. 394. 395. 396. 397. 398. 399. 400. 401. 402. 403. 404. 405. 406. 407. 408. 409. 410. 411. 412. 413. 414. 415. 416. 417. 418. 419. 420. 421. 422. 423. 424. 425. 426. 427. 428. 429. 430. 431. 432. 433. 434. 435. 436. 437. 438. 439. 440. 441. 442. 443. 444. 445. 446. 447. 448. 449. 450. 451. 452. 453. 454. 455. 456. 457. 458. 459. 460. 461. 462. 463. 464. 465. 466. 467. 468. 469. 470. 471. 472. 473. 474. 475. 476. 477. 478. 479. 480. 481. 482. 483. 484. 485. 486. 487. 488. 489. 490. 491. 492. 493. 494. 495. 496. 497. 498. 499. 500. 501. 502. 503. 504. 505. 506. 507. 508. 509. 510. 511. 512. 513. 514. 515. 516. 517. 518. 519. 520. 521. 522. 523. 524. 525. 526. 527. 528. 529. 530. 531. 532. 533. 534. 535. 536. 537. 538. 539. 540. 541. 542. 543. 544. 545. 546. 547. 548. 549. 550. 551. 552. 553. 554. 555. 556. 557. 558. 559. 560. 561. 562. 563. 564. 565. 566. 567. 568. 569. 570. 571. 572. 573. 574. 575. 576. 577. 578. 579. 580. 581. 582. 583. 584. 585. 586. 587. 588. 589. 590. 591. 592. 593. 594. 595. 596. 597. 598. 599. 600. 601. 602. 603. 604. 605. 606. 607. 608. 609. 610. 611. 612. 613. 614. 615. 616. 617. 618. 619. 620. 621. 622. 623. 624. 625. 626. 627. 628. 629. 630. 631. 632. 633. 634. 635. 636. 637. 638. 639. 640. 641. 642. 643. 644. 645. 646. 647. 648. 649. 650. 651. 652. 653. 654. 655. 656. 657. 658. 659. 660. 661. 662. 663. 664. 665. 666. 667. 668. 669. 670. 671. 672. 673. 674. 675. 676. 677. 678. 679. 680. 681. 682. 683. 684. 685. 686. 687. 688. 689. 690. 691. 692. 693. 694. 695. 696. 697. 698. 699. 700. 701. 702. 703. 704. 705. 706. 707. 708. 709. 710. 711. 712. 713. 714. 715. 716. 717. 718. 719. 720. 721. 722. 723. 724. 725. 726. 727. 728. 729. 730. 731. 732. 733. 734. 735. 736. 737. 738. 739. 740. 741. 742. 743. 744. 745. 746. 747. 748. 749. 750. 751. 752. 753. 754. 755. 756. 757. 758. 759. 760. 761. 762. 763. 764. 765. 766. 767. 768. 769. 770. 771. 772. 773. 774. 775. 776. 777. 778. 779. 780. 781. 782. 783. 784. 785. 786. 787. 788. 789. 790. 791. 792. 793. 794. 795. 796. 797. 798. 799. 800. 801. 802. 803. 804. 805. 806. 807. 808. 809. 810. 811. 812. 813. 814. 815. 816. 817. 818. 819. 820. 821. 822. 823. 824. 825. 826. 827. 828. 829. 830. 831. 832. 833. 834. 835. 836. 837. 838. 839. 840.

4. *Elaborar un mapa conceptual de las acciones de apoyo a la producción de alimentos en el sector agropecuario.*

- Cui, J. and M. J. Griffin, 1999.
 The effects of music on the
 cardiovascular system. *Journal of
 Music Therapy* 31, 1-15.
 Cui, J. and M. J. Griffin, 2001.
 The effects of music on the
 cardiovascular system. *Journal of
 Music Therapy* 33, 1-15.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | . | : | . | | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . |
| : | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . |



2
6 1 2 3 4 5 6

| Γ | $\Gamma = 0$ | $\Gamma = 1$ | $\Gamma = 2$ | $\Gamma = 3$ |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ν | 1.7 | 1.5 | 1.4 | 1.3 |
| Γ | 1.7 | 1.5 | 1.4 | 1.3 |

—

RECEIVED

La carta "venerdi" mostra una serie di strategie adottate

1. The first two are the same, but the second is more specific.
2. The first two are the same, but the second is more specific.
3. The first two are the same, but the second is more specific.
4. The first two are the same, but the second is more specific.
5. The first two are the same, but the second is more specific.

Enlightenment, particularly philosophy, was perceived as the source of progress and the 18th century was the century of enlightenment. The enlightenment was a movement that sought to replace superstition and dogma with reason and science. It was a movement that sought to liberate the human mind from the chains of ignorance and superstition. The enlightenment was a movement that sought to replace the authority of the church with the authority of reason and science. It was a movement that sought to liberate the human mind from the chains of ignorance and superstition. The enlightenment was a movement that sought to replace the authority of the church with the authority of reason and science. It was a movement that sought to liberate the human mind from the chains of ignorance and superstition.

1 2 3 4 5

La Biennale Arte dell'Anno ha una sede ideale, la sede "ideale", diventa sempre la stessa: quella di
molti, per un'occasione, una volta, per un anno.

1. *Notes on 0 and 1*, an extract of the paper by the author, published in *Compositio Mathematica*, 1964, no. 1, pp. 1-10.

| Row | col | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 |
|-------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Row 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 |

13

4. Fil de couleur, à l'usage de la solution de soude (certaines méthodes peuvent nécessiter des modifications de cette solution).

[illegible][illegible][illegible]

5 1 2 1 4 0 2

| |
|----------------------|
| E |
| = 7 0 1 7 2 2 |
| . 9 9 9 . 6 1 10 |
| . 8 - 12 = 2 7 12 12 |

Spr

SIL PROTAGEN PROPAGATION

L'annexe 84 propose des repères dans chacune des phrases suivantes :

- [illegible]

Leptothorax curvicauda (Petersen, 1967) was used as the "test" species with the following (in

2. **Severare una diffamazione** (comp. per il verbo "to propagate", tenere conto di minor numero di reati da diffamare) **una diffamazione** **una diffamazione** **una diffamazione**

2. *Stages of the 2000 process* – and 2002, 2004, and 2006 are ongoing exercises. A 2006/2007 cycle has been initiated, and 2008 is due for completion.

[illegible]

- [illegible]

© 2006 Pearson Education, Inc. All rights reserved. This publication is protected by copyright. Any unauthorized distribution or reproduction of this work is prohibited. All rights reserved.

| Process 1 | Process 2 | Process 3 |
|-----------|-----------|-----------|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

RESONANCE

Le mot "résonance" apparaît dans chacune des phrases suivantes :

1. C'est une fréquence qui résonne dans la cavité d'un instrument de musique.
2. C'est un phénomène qui se produit lorsqu'un objet est soumis à une vibration.
3. C'est un phénomène qui se produit lorsqu'un objet est soumis à une vibration.
4. C'est un phénomène qui se produit lorsqu'un objet est soumis à une vibration.
5. C'est un phénomène qui se produit lorsqu'un objet est soumis à une vibration.

1. Dans quelle situation se produit le phénomène de résonance ? (1 point)

2. Quels sont les effets de la résonance sur les objets ? (2 points)

3. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)

4. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)

1. Quel est le phénomène de résonance ? (1 point)
2. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)
3. Quels sont les effets de la résonance ? (1 point)
4. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)
5. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)
6. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)
7. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)
8. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)
9. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)
10. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)
11. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)
12. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)

1. Dans quelle situation se produit le phénomène de résonance ? (1 point)

2. Quels sont les effets de la résonance sur les objets ? (2 points)

3. Pourquoi les objets résonnent-ils ? (1 point)

AIGLE, Géraldine

Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

1. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :
2. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :
3. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :
4. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :
5. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

1. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

2. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

1. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :
2. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :
3. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :
4. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :
5. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

1. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

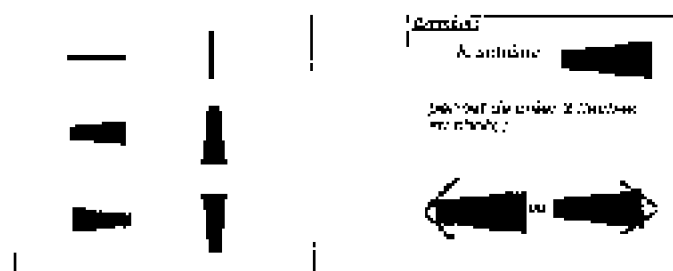
2. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

3. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

4. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

5. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

6. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :



7. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

8. Les mots qui ont trait aux sens de la phrase sont :

SQN

Nome do(a) Aluno(a): _____

Assunto: Matemática - Estatística

1. O gráfico abaixo representa a distribuição de frequências de uma população de 100 indivíduos, em relação ao número de filhos que possuem. Qual é a frequência absoluta do número 2?

☐ a) 10
☐ b) 20
☐ c) 30
☐ d) 40
☐ e) 50

2. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [20, 30)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

3. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [10, 20)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

4. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [30, 40)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

5. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [40, 50)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

6. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [50, 60)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

7. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [60, 70)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

8. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [70, 80)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

9. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [80, 90)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

10. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [90, 100)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

11. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [100, 110)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

12. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [110, 120)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

13. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

Qual é a frequência relativa da classe [120, 130)?

☐ a) 0,15
☐ b) 0,25
☐ c) 0,35
☐ d) 0,45
☐ e) 0,55

14. Um conjunto de dados apresenta a seguinte distribuição de frequências:

| Classe | Frequência Absoluta |
|----------|---------------------|
| [0, 10) | 15 |
| [10, 20) | 25 |
| [20, 30) | 35 |
| [30, 40) | 45 |
| [40, 50) | 55 |

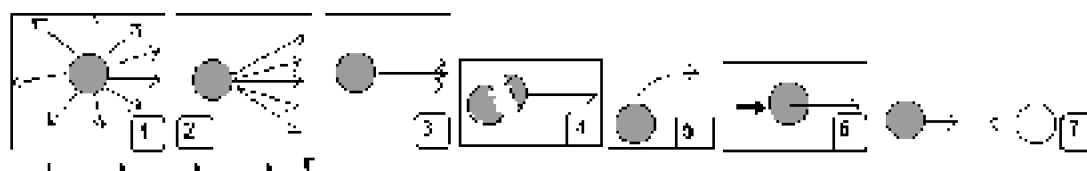
Qual é a frequência relativa da classe [130, 140)?

Émettre, Question 4 (recherche iconique) : résultats

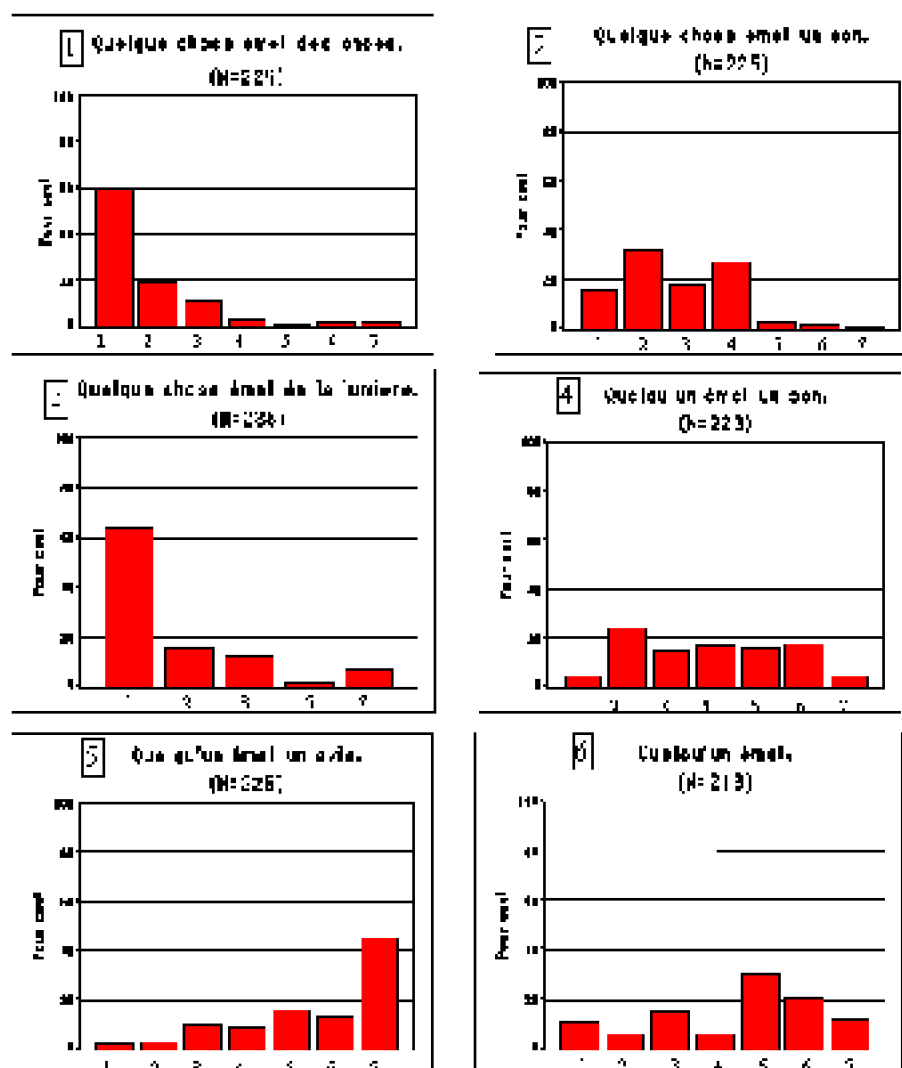
Attorney's fees and costs are not recoverable if the court finds that the defendant acted reasonably.

[illegible]

Zajímavé poznámky: Chybí 1/2

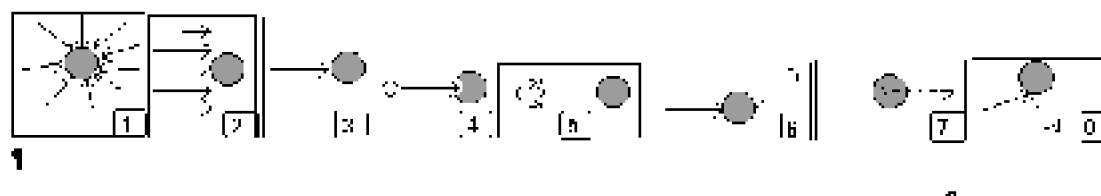


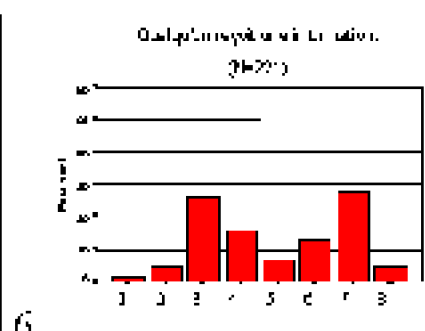
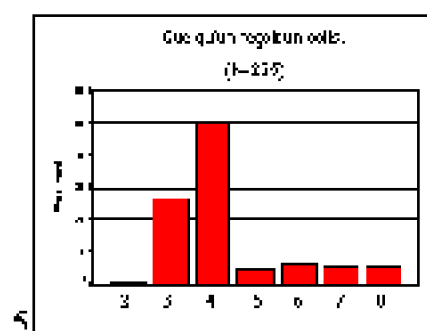
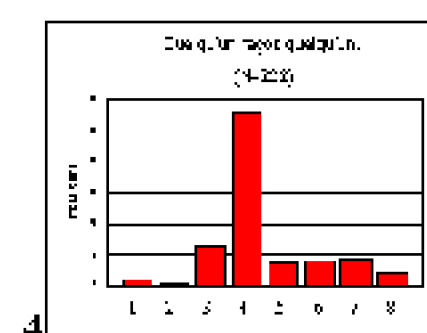
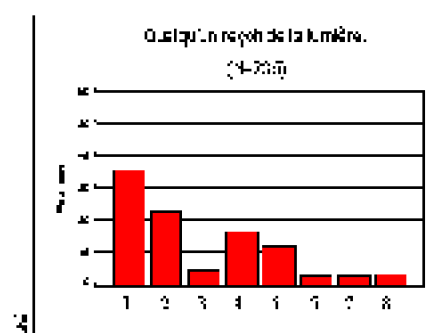
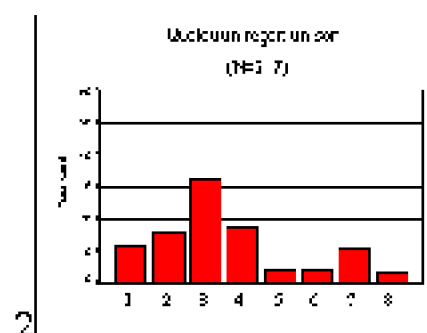
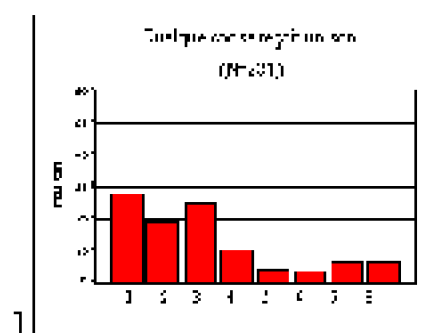
Other related articles plus a sidebar on how to buy a house.



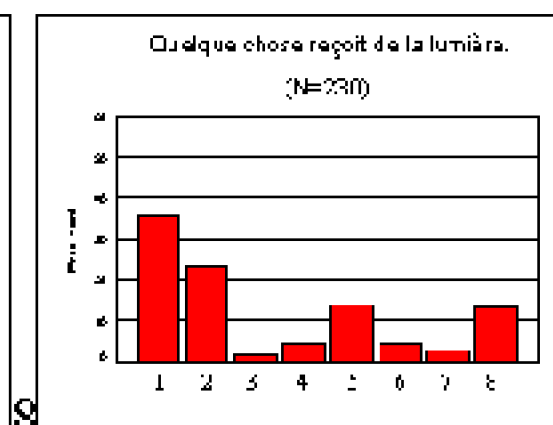
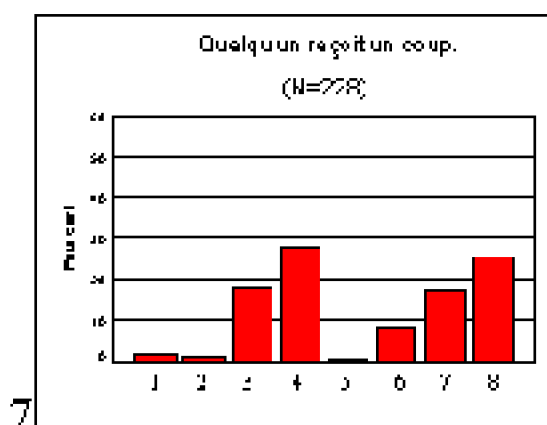
Recevoir, Question 4 (recherche iconique) : résultats

Attribuer à chaque schéma un des schémas conceptuels (lecture schématisée permet de passer à l'interprétation et à l'interprétation schématisée).





(Chaque fréquence correspond à la fréquence de la réponse et à la fréquence)



Définitions des termes étudiés (et dérivés) (Nouveau Petit Robert,

1995) (extraits essentiels)

Volume I.

1. Réunion d'un certain nombre de cahiers.
2. Chacune des parties d'un ouvrage.

Volume II.

1. Partie de l'espace à 3D.
2. Encombrement d'un corps.
3. Géom. Figure à 3D limitée par des surfaces.

4. (1761) Intensité (de la voix), conditionnée par la puissance du souffle et la bonne utilisation des cavités de résonance. **V. ampleur**. Sa voix manque de volume. *Volume sonore*, intensité des sons d'un instrument, de plusieurs instruments jouant ensemble. *Le volume de la radio*.

intensité

1. *Cour.* Degré d'activité, de force ou de puissance. *Grande, faible intensité. Intensité du son; de la lumière* (V. **Brillance**) - *Didact.* Amplitude d'un phénomène exprimée en valeur numérique. *Intensité d'un courant électrique* : quantité d'électricité traversant un conducteur pendant l'unité de temps (seconde). *Unité d'intensité*. V. **Ampère**. - *Fièvre qui augmente brusquement d'intensité, atteint un maximum d'intensité. Une crise terrible : "tous les phénomènes habituels avec une intensité décuplée"*.

2. Caractère de ce qui est intense. *Intensité du regard*. (V. **acuité, vivacité**) ; *d'un sentiment. Donner plus d'intensité à l'expression*. V. **renforcer**. *Phonét.* renforcement du son, surtout sensible dans l'émission des voyelles.

vibrer

1. Se mouvoir périodiquement autour de sa position d'équilibre avec une très faible amplitude et une très grande rapidité ; être en vibration. *Corde, plaque, membrane qui vibre. faire vibrer un diapason, une cloche.. Vitre qui vibre. Plancher, bateau qui vibre.*

(début XIXe) Avoir une sonorité tremblée (voix), qui dénote une émotion intense. Se manifester par le tremblement de la voix.

2.

Fig. Réagir à une émotion par une sorte de tremblement affectif ; être enflammé ou vivement ému. *Faire vibrer l'âme.*

3.

(tr.) Modifier dans ses propriétés physiques par une suite de vibration. *Béton vibré*, qui a subi le vibrage.

vibration

1.

Mouvement, état de ce qui vibre ; effet qui en résulte (son et ébranlement) Phys. Mouvement de va-et-vient d'un point matériel déplacé de sa position d'équilibre et qui y est ramené par l'effet de forces complexes, analysées au moyen d'une fonction harmonique. Le mot vibration peut désigner soit une période complète du phénomène (oscillation) soit le mouvement oscillatoire envisagé globalement (système qui entre en vibration). *Vibrations lumineuses, sonores, électromagnétiques. Amplitude de vibration* : le déplacement maximum.

2.

Caractère de ce qui vibre, change rapidement et périodiquement d'intensité, tremble. *La vibration d'une voix, de l'air, de la lumière.*

fréquence

1.

V *ieux*. Affluence, foule

2.

(XVI) caractère de ce qui arrive plusieurs fois, et *spécialt*, de ce qui se produit périodiquement, à intervalles rapprochés. **V. Nombre, répétition.** *"la fréquence de ces phénomènes commença à me donner de fortes inquiétudes"*. Ling. *fréquence d'un mot*, nombre d'occurrence de ce mot dans un corpus.

3.

(1900, électr.) nombre de cycles identiques d'un phénomène par unité de temps (en général, par seconde). *Fréquence d'un diapason, fréquence sonore. Fréquence respiratoire*, nombre de cycle respiratoires par minutes. **V., Cycle, Hertz. Courants alternatifs à basse, moyenne, haute fréquence.** Radio. *Bande, gamme de fréquence*, ensemble des fréquences comprises dans un intervalle. **V. Octave.** *Fréquence musicale ou acoustique*, correspondant aux tons audibles. *Modulation de fréquence.* Acoust. *fréquence d'un son*, nombre de vibration sonores par unité de temps (dont dépend la sensation de hauteur). *Statistique.* nombre d'observations par événement. **V. propabilité.** ANT. Rareté

émettre

v. tr.; conjug. *Mettre* (1792; dr. "interjecter", 1476; lat. *Emittere*, d'apr. *Mettre*)

1.

Produire au dehors, mettre en circulation, offrir au public. *Les billets émis par la banque de France. L'état émet des emprunts.. celui qui émet un chèque.*V. **Tireur**. Relig. *Émettre des vœux*, les faire au cours de la cérémonie de l'émission des vœux. *Fig. Exprimer. Il a émis le vœu que...* "Veuillez n'émettre aucune opinion sur les choses que nous verrons" (stendhal).

2.

(1830) Projeter spontanément hors de soi, par rayonnement (des radiations, des ondes). *Les particules émises par le noyau d'un corp radioactif.* Envoyer (des signaux, des images) sur ondes électromagnétiques; *absolt.* Faire des émissions. *Emettre sur telle longueur d'onde.* ant. Recevoir.

Émetteur, trice

n. et adj. (1792; de émettre)

1.

Fin. Personne, organisme qui émet (des billets, des effets). *Banque émettrice.*

2.

(1910, *Poste émetteur d'ondes*). *Poste émetteur*, ou *émetteur* : ensemble des dispositifs et appareils destinés à produire des *oscillations électriques*, dont l'énergie est rayonnée à distance sous forme d'onde électromagnétique capable de transmettre des messages télégraphiques, des sons ou des images.- *Spécialt.* Stations qui **effectue** des émissions radiophoniques.

3.

n.m. Système fonctionnel (mécanisme ou être vivant) qui émet, produit des messages. *L'émetteur de messages en langue naturelle.* V. **Locuteur**. ANT. *Récepteur*.

Recevoir

v.tr.

1.

(*Sens passif*). Se voir adresser (qqchse)

i.

Etre mis en possession de (qqchse) par un envoi, un don, un paiement, etc. Recevoir une lettre, un colis, un catalogue. J'ai reçu une lettre de mes parents. Recevoir un cadeau, des étrennes. Recevoir de l'argent. V. **Encaisser**. Recevoir une somme, un salaire, une gratification. V. **Percevoir**, **toucher**. Recevoir une récompense, une décoration, un prix.. V. **Obtenir**. Absolt. Donner et recevoir. Donner d'une main et recevoir de l'autre. (Compl.abstrait). Recevoir un ordre, une mission. Recevoir des compliments des félicitations. Recevez, Monsieur, mes salutations, l'assurance de mon dévouement. Recevoir un conseil, je n'ai pas de leçons à recevoir de vous. Recevoir de l'instruction, un certain genre d'éducation. (Relig.) Recevoir la communion, un

sacrement.

ii.

(1080) Etre atteint par, être l'objet de (qqch. Que l'on subit, que l'on éprouve). - (Concret). Recevoir de coups, des blessures. Qu'est-ce qu'il a reçu! V. **Attraper, prendre**. Recevoir la pluie, une averse, une douche. - Absolt. V. **Ecoper, trinquer**. - (Abstrait) recevoir un affront, des injures, un châtement, une leçon. V. **Essuyer**. (Sujet de chose) La lune reçoit la lumière du soleil. Corps qui reçoit un mouvement. La matière qui a reçu telle ou telle forme. - (choses abstraites) Etre l'objet de V. **Prendre**. Mot qui reçoit une signification.

2.

(Sens actif). Laisser entrer ou venir à soi, donner accès à.

i.

(1538) Laisser entrer (qqun qui se présente). Recevoir qqun à dîner, à sa table. - Faire entrer en allant chercher et en accompagnant. V. **Introduire**. Réserver accueil (bon ou mauvais). V. **Accueillir, traiter**. Etre bien reçu, avec les honneurs. Recevoir qqun à bras ouverts, avec empressement. Etre mal reçu. Il a été reçu comme un chien dans un jeu de quille. - Par plaisant. Recevoir l'ennemi à coups de canon. Absolt. Accueillir habituellement des amis, des invités ; donner une réception. Une femme qui sait recevoir. Ils reçoivent très peu. Accueillir les visiteurs. Monsieur de Directeur reçoit tel jour à telle heure. Fig. (Compl. De chose) V. **Accueillir**. Initiative bien ou mal reçue.

ii.

(début XIIIe) Laisser entrer (qqun) à certaines conditions, après certaines épreuves. Admettre. (Surtout au passif). Être reçu à une grande Ecole, à un examen, un concours. Candidats admissibles, reçus.

iii.

Faire entrer (qqch.), recueillir. Par ext. (D'un récipient) Creuset qui reçoit le minerai en fusion. Fleuve qui reçoit des affluents.

iv.

littér. Admettre en son esprit (comme vrai, légitime). V. **reconnaître**. Coutumes, usages reçus. Dictionnaire des idées reçues de Flaubert. *Dr.* Accepter comme recevable. *Recevoir une plainte. Fin de non-recevoir.*

3.

Se recevoir. v. *pron.*

i.

(récipr.) Ils se reçoivent beaucoup. (Sens II, 1))

ii.

(Réfl.) Turf et sport). Retomber d'une certaine façon, après un saut. Sauter qui se reçoit sur une jambe droite. Ant. *Donner, émettre, envoyer, offrir, payer, verser. Eliminer, exclure, refuser.*

Récepteurs

(1391; *receteur* "receleur", XIIIe; lat. *Receptor*, de *recipere* recevoir)

1.
(XVe) personne qui reçoit. - Mod. Et Comm. *Récepteur d'un compte courant*, correspondanzt qui reçoit le remise et en est débité.

2.
Techn. (1846) Appareil qui reçoit de l'énergie brute pour la transformer en énergie utilisable. *Les accumulateurs sont des récepteurs.* (1859) Appareil destiné à recevoir des ondes électromagnétiques. *Récepteur d'ondes de TSF.* V. **Détecteur**. *Récepteur de télégraphe.*- *Cour.* Ensemble comprenant un amplificateur. V. **Poste**. *Un récepteur de radio. Récepteur à transistors. Récepteur de poche. Récepteur de téléphone*, dispositif qui transforme le courant alternatif reçu en ondes sonores reproduisant le son initial; partie de l'appareil téléphonique où l'on écoute. V. **Combiné, écouteur**.

3.
Physiol. Structure ayant pour fonction de recevoir divers stimuli en les transformant en stimulations qui seront transmises aux organes correspondants. *Récepteur tactile, auditif, olfactif, gustatif.* (V. **Centre récepteur**).

4.
Fig. et littér. Organisme vivant recevant des impressions. "N'importe quel vivant... est un récepteur admirable de toutes ondes, sons, lumière" (alain). Ant. Emetteur.

Adjectif. (1859; de récepteur 1).

Qui reçoit, *spécialt.* Des ondes. Poste récepteur.V. **Récepteur** (1). *La dynamo "devenait réceptrice". Antenne réceptrice.* *Physiol. Centre récepteur*, structure nerveuse (centrale ou périphérique) recevant des influx. Ant. Emetteur, Générateur.

Résonner

v.intr. (*Résoner*, v. 1150; lat. *Resonare*)

1.
Produire un son accompagné de résonances. "Il faisait résonner la peau d'âne avec ses genoux, ses coudes..." (GAUTIER) "Tous les jours à cinq heures du matin, la cloche résonnait faiblement" (MUSS.). V. **Tinter**. Des pas résonnaient sur la chaussée.

2.
(en parlant du son). Retentir en s'accompagnant de résonances. "Au pied de la montagne, le matin, les voix résonnent comme dans un corridor" (Max Jacob). "...Résonnait de Schubert la plaintive musique" (Muss.)

3.
(en parlant d'un lieu, d'un milieu). S'emplir de bruit, d'échos, de résonances. V. **Retentir**. Faire insonoriser une salle qui résonne trop.- Résonner de... "La rue Raynouard à six heures, après la pluie, résonnait d'oiseaux et d'appels d'enfants"

(Colette).

Résonance ou (vieilli) Résonnance

n.f. (v. 1450, mus.; de *résonner*)

1.

Cour. Prolongement ou amplification des sons dans certains milieux sonores (V. **Résonner**). - *Caisse de résonance* : enceinte fermée où se produisent des phénomènes de résonance. Propriété d'un lieu où ce phénomène se produit.

2.

Littér. Effet de ce qui se répercute dans l'esprit. V. **Echo, retentissement**

3.

Sc. (1862) Phénomène par lequel un système physique en vibration peut atteindre une très grande amplitude, lorsque la vibration excitatrice se rapproche d'une "fréquence naturelle" de ce système. *Résonance du son, de la voix* (sens courant 1°) - *Etre, entrer en résonance. Electr.* Phénomène tendant à produire des courants relativement importants dans des circuits qui réagissent mutuellement. *Résonance magnétique. Spectre de résonance. Potentiel de résonance. Niveau de résonance nucléaire.*

aigu, uë

1.

Terminer en pointe ou en tranchant. (V. **acéré, coupant, pointu**). *Une flèche aigüe. Oiseau au bec aigu. - Angle aigu*, plus petit que l'angle droit (opposé à obtus). Très fin ou effilé. *Pointe aigüe.*

2.

(Son). D'une fréquence élevée, en haut de l'échelle des sons. *Une note aigüe. Une voix aigüe ou grave. V. aigre, criard, perçant, strident.. - Subst.* L'aigu, le registre supérieur d'un instrument ou d'une voix. *Passe du grave à l'aigu.* Accent aigu.

3.

(Douleur). Intense et pénétrant. V. *Vif, violent.* (Maladie) Apparition brusque et évolution rapide (opposé à chronique). *Phases, crises aigües.* Par analogie conflit aigu entre deux états.

4.

Fig. Particulièrement vif et pénétrant dans le domaine de l'esprit. V. **incisif, perçant, subtil.** *Sens aigu des réalités*

grave

1.

(abstrait)

i.

Fig. Qui se comporte, agit avec dignité.

- ii.
qui a de l'importance, du poids.
- iii.
Susceptible de conséquence sérieuses, de suites fâcheuse, dangereuse.
2.
(concret)
- i.
(XVIe) Lourd, pesant.
- ii.
(Xve) se dit des sons produits par des ondes de faibles fréquences (par ex. de 100 à 200 périodes par seconde)., appartenant aux degrés inférieures de l'échelles musicale.
V. Bas. Son, note, voix grave. V. caverneux, profond ; basse, contralto.
- iii.
Gramm. Accent grave.
3.
Adj. et adv. *Mus.* Lent majestueux, solennel (en parlant d'un mouvement musical).
- Son
n.m. (v. 1160 ; lat. *sonum*)
1.
Sensation auditive causée par les perturbations d'un milieu matériel élastique fluide ou solide (spécialement l'air). – physiol. Résultat de "la stimulation des éléments sensoriels de l'oreille interne (cellules ciliées), le plus souvent par les ondes acoustiques" (Piéron) ; ce phénomène physique. => **audition ; bruit**. "le son pur est une sorte de création. La nature n'a que des bruits" (Valéry). – Ecouter, entendre, percevoir un son. Son aigu, grave. "Un son faible d'abord s'en échappa, puis grandit, s'accroît, vibrant, aigu, plainte du cuivre frappé" (Maupass). Sons discordants (=> **cacophonie, canard, couac, désaccord**), harmonieux (=> **eurythmie, harmonie**). – Produire, émettre un son, des sons, se dit d'une substance heurtée qui vibre, d'un instrument... => **résonner, sonner ; sonore**. Le son des guitares. Son de cloche. => **sonnerie**. Prov. Qui n'entend qu'une cloche n'entend qu'un son. – Sons servant à la communication chez l'homme et certains animaux. => **bruit, cri, voix**. "Le son de sa voix qui était à la fois clair et un peu voilé" (Maurois). "Les grands singes émettent des sons variés" (J. Rostand). Sons articulés, inarticulés. Le travail du son, dans le chant. => **sonorité, timbre, voix**. Son filé. – au son de... : en écoutant, en suivant la musique de... Danser au son de l'accordéon. spécialt Tout élément du langage parlé ; la combinaison de ces éléments. => **phonème ; prononciation**. Son fermé, ouvert. (=> **voyelle**) ; son nasal, guttural. Similitude de sons (=> **consonnance, homophonie**). Succession harmonieuse des sons. => **euphonie**. Notations des sons (=> **phonétique**).
- 2.

Phys. Vibration d'un corps matériel transmise par une onde élastique. Un son est caractérisé par sa hauteur. (=> **fréquence**), son intensité (=> **bel, décibel, phone**), son timbre (=> aussi **sonogramme**). Célérité, vitesse de propagation du son dans l'air, l'eau, les métaux. Dépasser la vitesse du son. (=> **mach, hypersonique, supersonique**). Mur du son. – Son simple, dû à une vibration sinusoïdale. Son complexe. (=> **bruit**). Cour. Sons musicaux : sons simples ou complexes dont la hauteur tonale est déterminée. => **note ; gamme, ton, tonalité**. Sons simultanés. => **accord**. Organisation des sons par l'art musical. => **harmonie, polyphonie**. Enregistrement du son. (=> **stéréophonie, dolby**). Prise de son (=> **microphone**). Reproduction du son (=> **audio ; baladeur, chaîne, magnétoscope**). Transmission du son (=> **radiophonie, téléphonie**). par ext. Baisser le son (d'un poste de radio, de télévision), l'intensité du son.- par ext. Ingénieur du son, qui s'occupe de l'enregistrement, de la prise de son. Preneur de son. L'équipe du son. – par appos. Spectacle son et lumière : spectacle nocturne comportant l'illumination d'un monument accompagné d'une évocation sonore, musicale... de son histoire.

Modèle microscopique de la propagation du son accompagnant l'utilisation de *simulaSON*

Modèle microscopique de la propagation du son

modèle du gaz

Les gaz sont modélisés par un très grand nombre de particules. Les particules ont toutes la même taille pour un milieu donné. Elles peuvent être assimilées à de très petites sphères. Entre les particules, il n'y a rien : c'est le vide.

Ces particules sont en perpétuelle agitation. Du fait de cette agitation, les particules s'entrechoquent et changent de direction très souvent. Elles bougent très vite en permanence dans n'importe quelle direction.

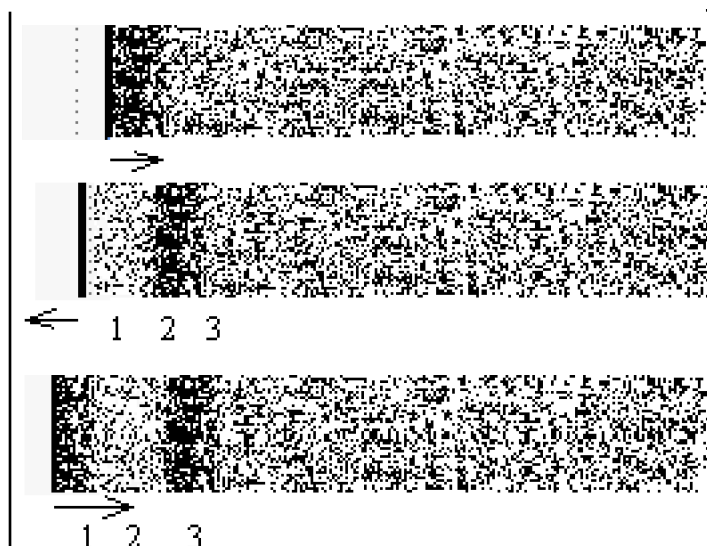
Les particules occupent tout l'espace disponible et sont réparties également dans l'espace où se situe le gaz.

modèle de la propagation du son dans un gaz

Quand on modélise une surface qui vibre au contact d'un gaz, on considère qu'elle crée des zones où les particules sont plus resserrées que quand le gaz est au repos (zone de compression ou comprimée) et des zones où les particules sont moins serrées que quand le gaz est au repos (zone de dilatation ou dilatée).

Les particules sont attirées vers les zones où il y a peu de particules (zones dilatées) et rejetées des zones où il y en a beaucoup (zones comprimées).

Création et propagation des zones comprimées et dilatées :



Lorsqu'un ensemble de particules subit un choc de la surface vibrante de la source sonore, tout se passe comme si, en plus de leur mouvement d'agitation, était ajouté un autre mouvement. Les particules sont d'abord comprimées contre la surface vibrante puis se déplacent légèrement toutes dans la même direction.

Les particules de la "tranche" 1, en se déplaçant vers la droite, entrechoquent les particules situées un peu plus loin par rapport à la surface vibrante (tranche n°2). Ceci a pour effet de comprimer et déplacer légèrement les particules de la tranche n°2. Lorsque la surface vibrante repart dans l'autre sens, il existe une zone où il y a très peu de particules. Les particules initialement comprimées de la tranche n°1 vont alors se diriger vers cette zone et revenir vers la surface vibrante. Cet ensemble de particules a donc fait un aller-retour.

Pendant que les particules de la tranche n°2 entrechoquent et compriment les particules de la tranche n°3, la tranche n°1 est à nouveau comprimée par la surface vibrante qui vient donc de faire un aller-retour. Il va donc y avoir une zone dilatée (n°2) entre deux zones comprimées (n°1 et n°3).

Le mécanisme se reproduit tant que la surface vibre : les particules des tranches n°1 et n°3 qui sont comprimées et qui se déplacent légèrement vont comprimer les particules proches (tranche n°2 et n°4) d'elles : on dit que la vibration **se propage de proche en**

proche.

En observant le phénomène pendant un temps suffisant pour qu'il y ait plusieurs aller-retours de la surface vibrante, on constate que chaque particule fait des aller-retours autour de la position moyenne qu'elle occupe quand le gaz est au repos : **il n'y a pas de déplacement d'ensemble de la matière.**

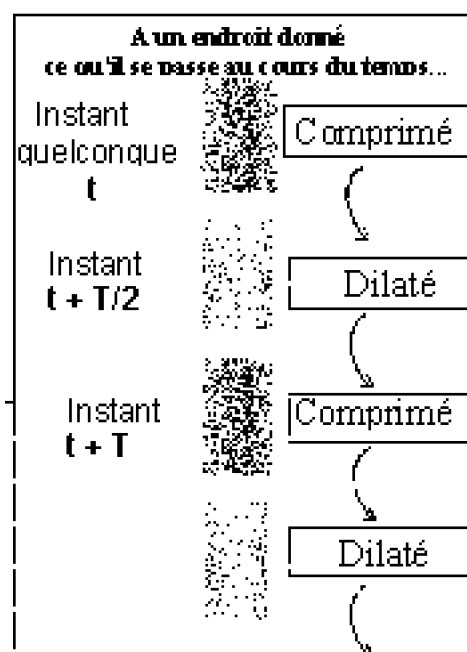
Chaque compression et dilatation va se propager après sa création. Dans le milieu, à un instant donné, il y a une **succession de tranches comprimées et dilatées régulièrement espacées.**



A un instant donné, succession dans l'espace de tranches dilatées et comprimées.

Si on regarde ce qu'il se passe à un endroit donné, une même tranche est alternativement comprimée ou dilatée. **L'air à cet endroit passe donc alternativement d'un état comprimé à un état dilaté**, et revient dans le même état tout les intervalles de temps T .

La propagation des états plus ou moins comprimés constitue une onde sonore.



Tâches proposées dans la version d'expérimentation de *SimulaSON*

- Public visé : élèves de seconde n'ayant pas encore reçu de formation sur le son ou en cours de formation
- Les tâches seront formulées en langage naturel seulement.
- Les réponses doivent être produites sur papier libre, pas obligatoirement en langage naturel.
- Estimation du temps total de résolution : environ 4h.

Utilisation des fenêtres "graphe", "vibration", "écouter", "paramètres".

⁵³ S : "sémiotique" ; C : "contingente" ; T : "transfert" (lorsqu'il y a demande de transfert ou lorsqu'il peut *a priori* être fait spontanément).

| N° | Énoncé | fenêtres disponibles | Indications sur les savoirs en jeu | type ⁵³ |
|---|---|---------------------------|--|--------------------|
| Sensation sonore et paramètres du modèle | | | | |
| 1a | <i>Comparer la fréquence des vibrations représentées par les points indiqués sur le graphe. On propose de comparer deux par deux : comparaison A et B comparaison A et D comparaison A et C</i> | VALEURS ajouts sur GRAPHE | lecture et compréhension de la signification du graphe distinction points et vibration | S |
| 1b | <i>Comparer l'amplitude des vibrations représentées par les points indiqués sur le graphe. On propose de comparer deux par deux : comparaison A et B comparaison A et D comparaison A et C</i> | VALEURS ajouts sur GAPHE | lecture et compréhension de la signification du graphe distinction points et vibration observable | S |
| Compréhension de la signification du graphe | | | | |
| 2a | <i>"Quand la fréquence augmente, comment évolue le mouvement d'aller-retour ?"</i> | VIBRATION | la fréquence, 011 élément du modèle (vibration) liée à un paramètre perceptif (hauteur du son) relation entre (M-CEm) et CE(son) | S |
| 2b | <i>"Quand l'amplitude"</i> | VIBRATION | l'amplitude, 011 élément du modèle | S |

⁵³ S : "sémiotique" ; C : "contingente" ; T : "transfert" (lorsqu'il y a demande de transfert ou lorsqu'il peut *a priori* être fait spontanément).

| N° | Énoncé | fenêtres disponibles | Indications sur les savoirs en jeu | type ⁵³ |
|-----------------------------------|--|--|--|--------------------|
| | <i>augmente, comment évolue la mouvement d'aller-retour ?"</i> | | (vibration) liée à un paramètre perceptif (hauteur du son) relation entre (M-CEm) et CE(son) | |
| Vibration et paramètres du modèle | | | | |
| 3a | <i>"Quand la fréquence augmente, qu'est-ce qui change au niveau du son que vous entendez ?"</i> | SON | test que la description "naturelle", au niveau lexical et sémantique manipulation du graphe | S |
| 3b | <i>"Quand l'amplitude augmente, qu'est-ce qui change au niveau du son que vous entendez?"</i> | SON | test que la description "naturelle", au niveau lexical et sémantique manipulation du graphe | S |
| 4 | <i>Générer la vibration correspondant au point A sur le graphe. Calculer la fréquence de la vibration (nombre d'aller-retours en 1 seconde). Puis, une fois que vous avez noté la valeur de la fréquence, cliquez sur le bouton « vérifier » pour obtenir la valeur indiquée par le logiciel. Comparer</i> | Ajout sur GRAPHE
VIBRATION
CHRONO
VALEURS | | C |

⁵³ S : "sémiotique" ; C : "contingente" ; T : "transfert" (lorsqu'il y a demande de transfert ou lorsqu'il peut *a priori* être fait spontanément).

| N° | Énoncé | fenêtres disponibles | Indications sur les savoirs en jeu | type ⁵³ |
|---|--|----------------------|---|--------------------|
| | <i>les deux valeurs sur votre feuille.</i> | | | |
| Aigu/grave - fréquence et fort/faible - amplitude | | | | |
| 5a | <p><i>On souhaite comparer les sons correspondants aux points A, B, C, D, du points de vue de leur caractère aigu ou grave. Compléter à l'aide de "plus aigu", "plus grave", "aussi aigu" ou "aussi grave". A est que B / C est que B A est que D / C est que D A est que C / C est que A Lorsque vous avez répondu, cliquez sur «vérifier» pour pouvoir écouter les sons correspondants. Notez sur votre feuille les cas où votre prédiction est bonne et les cas où votre prédiction est mauvaise. Répondez à nouveau si votre précision a été mauvaise.</i></p> | SON ajouts sur GAPHE | Besoin d'écouter ? Relation fréquence – hauteur | C |

⁵³ S : "sémiotique" ; C : "contingente" ; T : "transfert" (lorsqu'il y a demande de transfert ou lorsqu'il peut *a priori* être fait spontanément).

| N° | Énoncé | fenêtres disponibles | Indications sur les savoirs en jeu | type ⁵³ |
|----|--|----------------------|---|--------------------|
| 5b | <p>On souhaite toujours comparer les sons correspondants aux points A, B, C, D, du point de vue de leur caractère fort ou faible. Compléter à l'aide de "plus fort", "plus faible", "aussi fort" ou "aussi faible". A est que B / C est que B A est que D / C est que D A est que C / C est que A</p> <p><i>Lorsque vous avez répondu, cliquez sur «vérifier» pour pouvoir écouter les sons correspondants. Notez sur votre feuille les cas où votre prédiction est bonne et les cas où votre prédiction est mauvaise. Répondez à nouveau si votre précision a été mauvaise.</i></p> | SON ajouts sur GAPHE | Besoin d'écouter ? Relation amplitude - niveau sonore | C |

⁵³ S : "sémiotique" ; C : "contingente" ; T : "transfert" (lorsqu'il y a demande de transfert ou lorsqu'il peut *a priori* être fait spontanément).

Utilisation de la fenêtre "microscopique"

| N° | énoncé | fenêtres disponibles | type |
|--|---|------------------------------|------|
| Familiarisation avec le modèle, utilisation et interprétation de la fonction "voir une particule particulière" | | | |
| 6 | <i>Dans le milieu sonore, est-ce que les particules se déplacent à travers le tuyau, de gauche à droite ? (N'hésitez pas à faire varier la fréquence et l'amplitude). Lorsque vous avez répondu, cliquez sur «vérifier» pour pouvoir observer une particule ou un ensemble de particules et notez sur votre feuille si ce que vous observez est en accord avec ce que vous avez prédit.</i> | MICROSC | C |
| mouvement de la source et mouvement d'une particule (Distribution du modèle microscopique) | | | |
| 7 | Visualisez la vibration dont les paramètres sont fréquence = 0,5 Hz amplitude = 1,3 cm a) Mesurer la fréquence de vibration d'une particule dans le gaz simulé b) La fréquence de vibration est-elle la même pour toutes les particules ? | CHRONO
VALEURS
MICROSC | C |

| N° | énoncé | fenêtres disponibles | type |
|-------------------------------------|--|---------------------------------|------|
| 8 | <i>Si maintenant la fréquence est 0,9 Hz, quelle est la fréquence de vibration d'une particule ? Expliquez pourquoi la fréquence de vibration d'une particule est liée de cette façon à la fréquence de vibration de la source ?</i> | CHRONO
VIBRATION
MICROSC | C |
| Nature de la propagation et vitesse | | | |
| 9 | <i>En physique, on parle de la vitesse de propagation "du son". Essayez de préciser ce qui se propage effectivement ?</i> | MICROSC
VIBRATION | C-T |
| 10 | <i>La vitesse de propagation du son dépend-elle de la fréquence ? La vitesse de propagation du son dépend-elle de l'amplitude ?</i> | MICROSC
VIBRATION
VALEURS | C-T |
| 11 | <i>Calculer de façon approximative la vitesse de propagation du son dans le milieu simulé. Lorsque vous avez répondu, cliquez sur "vérifier" pour comparer la valeur trouvée à la valeur indiquée</i> | MICROSC | C |

| N° | énoncé | fenêtres disponibles | type |
|--------------------------------------|---|--|------|
| | <i>par le logiciel.</i> | | |
| tâches appelant clairement transfert | | | |
| 12 | <i>Si un son devient plus fort, est-ce qu'il va plus vite ? Justifiez</i> | Toutes | T |
| 13 | <i>Si on met la flamme d'une bougie devant un haut-parleur qu'est-ce qu'il va se passer ?</i> | | T |
| Longueur d'onde | | | |
| 14 | <i>Générer la vibration dont les paramètres sont fréquence = 0,7 Hz amplitude = 1,2 cm Que représente la distance indiquée par le paramètre "longueur d'onde" ?</i> | MICROSC
VIBRATION
VALEURS ajoutés sur GRAPHE | C |
| 15 | <i>Quel est le temps nécessaire pour qu'une zone comprimée parcourt la distance égale à une longueur d'onde ? Comparer ce temps et la période de vibration pour un son donné.</i> | MICROSC
VIBRATION
VALEURS | C |
| 16 | <i>Peut-on expliquer grâce à la simulation pourquoi on entend un son moins fort quand</i> | | T |

| N° | énoncé | fenêtres disponibles | type |
|----|---|----------------------|------|
| | <i>on recule ?</i> | | |
| 17 | <i>Au fur et à mesure qu'un son se propage, est-ce qu'il ralentit, est-ce qu'il accélère ou est-ce qu'il garde toujours la même vitesse ?</i> | | T |

Utilisation de la fenêtre "capteurs et écran" (toutes les fenêtres sont disponibles)

| N° | énoncé | type |
|---|--|------|
| Sur l'oreille | | |
| 18 | <i>Lorsqu'on entend un son émis par un haut-parleur, le tympan de l'oreille bouge. En utilisant ce que vous savez maintenant sur la propagation du son : a) Expliquez ce qui le fait bouger. b) Expliquez comment son mouvement peut dépendre du son entendu, et donner les modifications du mouvement du tympan quand le son devient plus fort et quand le son devient plus aigu.</i> | T |
| Liens entre capteurs et microphones (présence simultanée de matériel) | | |
| 19 | <i>Comment évolue le signal fourni par un capteur quand l'air situé à son niveau se comprime.</i> | C |
| 20 | <i>Si on observe maintenant le signal fourni par un microphone recevant un son émis par un haut-parleur, quelle(s) différence(s) va-t-on voir entre ce qu'on observe sur l'oscilloscope et ce qu'on observe sur l'écran de la simulation ? Vérifiez en faisant l'expérience (demander de l'aide) et interprétez la différence.</i> | T |
| 21 | <u>Fonctionnement simplifié du microphone.</u> Pour pouvoir rendre compte de l'état de l'air, le micro est constitué, comme le tympan, d'une membrane qui se déplace en fonction de l'état de l'air : - si l'air est comprimée, la membrane est enfoncée vers l'intérieur du micro. - si l'air est dilatée, la membrane est déplacée vers l'extérieur du micro. Le signal | T |

| N° | énoncé | type |
|-------------------------------------|--|------|
| | <p>électrique fournit par le micro est proportionnel au déplacement de la membrane.</p> <p><i>Si la membrane du haut-parleur vibre avec une fréquence qu'on appelle f, et avec une amplitude qu'on appelle a, prévoyez : - si la fréquence de vibration de la membrane du micro sera supérieure, égale ou inférieure à f - si son amplitude sera supérieure, égale ou inférieure à a. Justifiez vos prédictions.</i></p> | |
| 22 | <p><i>Si on mesure maintenant avec deux micros qui ne sont pas situés au même endroit, que va-t-on observer sur l'écran de l'oscilloscope ? (Faites un schéma si nécessaire). Faites une prédiction en vous aidant éventuellement des capteurs de la simulation puis vérifiez en faisant l'expérience.</i></p> | T |
| 23 | <p><i>Pourquoi les courbes fournies par deux micros placés à des endroits différents ne sont-elles pas forcément superposées ?</i></p> | T |
| Détermination de la longueur d'onde | | |
| 24 | <p><i>On rappelle que la longueur d'onde est la distance entre deux zones comprimées consécutives. Le haut-parleur vibre maintenant avec une fréquence égale à 5000 Hz. On veut connaître la longueur d'onde du son émis par le haut-parleur avec le matériel et les moyens dont vous disposez (on peut déplacer les deux micros). Trouvez une méthode et donnez la valeur de cette longueur d'onde.</i></p> | T |
| 25 | <p><i>Trouvez une méthode pour</i></p> | T |

| N° | énoncé | type |
|----|---|------|
| | <i>déterminer la valeur de la vitesse du son qui est émis par le haut-parleur et qui se propage dans l'air.</i> | |