

***Evaluer la compréhension des concepts de
mécanique chez des élèves de seconde :
Développement d'outils pour les
enseignants***

Thèse présentée par Marie Coulaud

pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'Education

préparée sous la direction d'Andrée Tiberghien au sein de l'équipe ADIS-Ist (groupe
COAST) de l'UMR ICAR (UMR 5191)

JURY : Martine MÉHEUT Rapportrice Jean-Louis CLOSSET Rapporteur Robin MILLAR Andrée
TIBERGHIE Directrice

Table des matières

Préface .	1
Introduction . .	3
Partie 1 Cadre théorique . .	5
Chapitre 1 : Les pratiques d'évaluation dans les classes .	5
1. Quelle évaluation ? .	5
2. Le processus d'évaluation . .	8
3. Quelques aspects historiques de l'évaluation scolaire .	11
4. L'enseignant et l'évaluation .	12
5. L'évaluation du point de vue de l'élève : la situation de devoir surveillé .	18
6. L'évaluation scolaire : entre évaluateur et évalué .	22
7. La validité de l'évaluation . .	24
Chapitre 2 : La compréhension de la mécanique .	26
1. Réflexions générales sur compréhension et concept .	26
2. Quels outils la didactique de la physique nous apporte-t-elle pour évaluer la compréhension ? . .	27
Chapitre 3 : Evaluation en didactique .	33
1. La place de l'évaluation dans les séquences développées . .	33
2. Les tests d'évaluation utilisés par les chercheurs .	34
3. Quelques réflexions pouvant aider au développement d'outils d'évaluation . .	36
4. Des tests pour les évaluations internationales .	37
5. Des outils pour les enseignants . .	38
6. Conclusion . .	40
Chapitre 4 : Questions de recherches et méthodologie .	41
1. Questions de recherche et objectifs de développement .	41
2. Méthodologie . .	42
Partie 2 Production des tests . .	45

Chapitre 5 : Contexte de la recherche et de la production .	46
1. Les projets recherche et développement du groupe COAST .	46
2. Le projet contexte de notre recherche : le projet SESAMES . .	46
Chapitre 6 : Bases de la construction des tests .	48
1. Indications sur les pratiques des enseignants français .	48
2. Etude préalable .	50
3. Les tests et exercices existants . .	55
4. Analyse du contenu en termes de concepts .	60
5. Utilisation des travaux de recherche .	72
6. Synthèse de la méthodologie de construction . .	75
Chapitre 7 : Présentation des tests . .	77
1. Le mouvement . .	77
2. Les forces .	85
3. Les lois de la mécanique . .	97
4. Le test bilan .	104
Chapitre 8 : Ensemble des quatre tests : cohérence et croisements a priori .	116
Conclusion .	117
Partie 3 Analyse des tests .	121
Chapitre 9 : Recueil de données . .	122
1. Passation des tests .	122
2. Entretiens . .	124
3. Synthèse des données recueillies . .	127
Chapitre 10 : Méthodologie de validation .	127
1. Fonctionnalité .	127
2. Validité de l'outil test d'évaluation .	128
Chapitre 11 : Analyse et résultats . .	135
1. Test 1 . .	135
2. Test 2 . .	147
3. Test 3 . .	161

4. Test 4 . .	168
Chapitre 12 : Validation . .	189
Fonctionnalité .	189
2. Validité des tests .	191
3. Limites de validité .	192
Chapitre 13 : Conclusion . .	206
1. Validité des outils développés .	207
2. Comportement des élèves en situation de devoir surveillé .	213
Partie 4 Diffusion des outils pour les enseignants : PEGASE .	217
Chapitre 14 : Notre objectif de diffusion .	217
1. Les attentes des enseignants et la nécessité d'adapter nos résultats . .	217
2. Ce que nous voulons fournir aux enseignants . .	219
Chapitre 15 : Présentation de PEGASE .	220
Chapitre 16 : Développement de PEGASE : un exemple . .	224
Conclusion .	235
1.Retour sur les questions de recherche .	236
1.1. Production d'outils .	236
1.2. Utilisation et validation des outils .	237
1.3. Observations des élèves en situation de devoir surveillé . .	238
2. Intérêt du travail .	239
3. Perspectives .	239
Références bibliographiques .	241

Préface

J'ai toujours été dans ma scolarité ce qu'il est convenu d'appeler une « bonne élève ». J'ai eu la chance d'avoir des notes suffisamment bonnes pour me permettre de franchir aisément les différentes étapes de mon cursus. Il n'était alors aucunement question de remettre en cause mes aptitudes dans les différentes disciplines. Cependant, je gardais toujours en moi cette impression d'être un imposteur, avec la peur que quelqu'un voie clair dans mon jeu. J'avais l'impression que j'avais compris les règles de l'évaluation scolaire, que je savais ce qu'on attendait de moi et que je savais le donner. Mais lorsque je me demandais si je maîtrisais vraiment les contenus en jeu, si j'étais capable de les appliquer à ma vie de tous les jours, je savais que ce n'était pas le cas. Je pouvais par exemple avoir une excellente note sur un devoir sur les circuits RLC et être complètement incapable d'expliquer simplement ce qu'était l'électricité et pourquoi cette lampe électrique s'allumait quand j'appuyais sur ce bouton. C'est d'ailleurs plus souvent face à mes amis et proches que j'ai perdu la face que face à mes professeurs. J'étais capable de réciter toutes les formules parfaitement, de mener à bout des calculs compliqués et de refaire les exercices les plus difficiles. Je pouvais même expliquer à mes camarades ce qu'ils ne comprenaient pas, voire les aider à avoir de meilleures notes. Mais lorsque mes amis me demandaient « Tiens, toi qui fais de la physique, est-ce que tu peux m'expliquer pourquoi le rideau de douche vient toujours se coller à moi ? », j'en étais tout simplement incapable.

Je parlais tout à l'heure d'imposture mais je me rendais bien compte que mon enseignant de physique ne me demandait pas d'être capable d'expliquer tous ces « phénomènes de la vie quotidienne », que mon cours n'était pas fait pour que je les comprenne. J'étais en quelque sorte en règle avec ce système. La physique n'était pour moi qu'un jeu, qu'un monde de théories, de modèles, de calculs, où je devais appliquer des algorithmes. Elle était déconnectée du champ expérimental (j'étais d'ailleurs ce type de bonne élève totalement effrayée par les travaux pratiques). Et cela ne m'a manifestement jamais empêché de réussir.

Une année d'étude à Montréal m'a aidé à comprendre que la théorie n'était pas au centre de toute la physique et que celle-ci se nourrissait d'expériences et de « réalités ». Mon passage à l'Ecole Normale Supérieure de Lyon m'a montré que la connaissance des formules et la maîtrise des calculs n'étaient pas suffisantes pour comprendre et interpréter les phénomènes. Avoir une maîtrise de physique sans aucun « sens physique » était devenu suffisamment déroutant pour que je me décide à me pencher sur le sujet. J'aurais pu tenter de préparer l'agrégation et espérer que cette formation me « remette à niveau », me donne les bases nécessaires pour comprendre le véritable intérêt de la physique. J'ai préféré m'orienter vers la didactique afin de mieux comprendre le fonctionnement de l'enseignement de la physique.

Lorsque le moment de choisir mon sujet de thèse arriva, je saisis l'opportunité de travailler sur l'évaluation pour les raisons évoquées plus-haut. Le financement que j'ai eu la chance d'obtenir (bourse BDI –CNRS) nécessitait un projet concret, ayant des applications. Nous avons donc choisi un sujet de recherche qui aboutirait à une production d'outils pour les enseignants.

Ces trois années furent pour moi une très belle expérience, où je pus réfléchir à toutes ces questions. Le meilleur souvenir que j'en garde reste les rencontres avec les élèves, tous si différents et grâce auxquels j'ai pu comprendre les multiples façons de fonctionner dans ce système scolaire. Je me suis retrouvée dans certains, j'ai été admirative face à d'autres. Tous

m'ont laissé un très beau souvenir, et je les en remercie. Quelle chance j'ai eu de pouvoir passer ces trois années à tenter de comprendre quelques aspects de la complexité des fonctionnements humains.

Je finis aujourd'hui cette thèse avec un sentiment partagé, entre satisfaction et sentiment de n'avoir pas terminé ce que j'avais commencé. Je crois que c'est le lot de tout chercheur (sinon nous nous appellerions des trouveurs). J'espère sincèrement que mon travail pourra aider les enseignants et qu'il permettra aux élèves de montrer plus simplement ce qu'ils ont compris.

Introduction

L'évaluation joue un rôle central dans la relation d'un élève à une discipline. Elle lui renvoie l'image de ce qu'il « vaut » relativement à cette discipline (étymologiquement « évaluer » vient de « value » qui signifie « valeur, prix »). Elle peut lui permettre de se situer dans son apprentissage, générant parfois une réelle motivation. Elle est quelquefois source d'angoisse, de satisfaction, ou de déception. Pour l'enseignant, l'évaluation est un objet délicat, totalement inévitable, qui peut être à la fois un moyen de gestion de son enseignement, un instrument de pouvoir et un véritable fardeau. L'enseignant peut se sentir « prisonnier » entre son devoir d'évaluer les élèves, son désir de faire aimer sa discipline et d'aider ses élèves à apprendre ou encore l'image qu'il renvoie à ses collègues. L'évaluation de ses élèves n'en reste pas moins nécessaire et utile au bon déroulement de la classe, ponctuant l'enseignement de bilans afin de s'assurer que les élèves ont compris et que le cours peut continuer.

L'évaluation des élèves par les enseignants se retrouve donc au centre du système scolaire, au centre de la relation enseignant-élèves-savoir. En ce sens, elle mérite que la didactique s'intéresse à elle. La didactique peut permettre une étude de l'évaluation du point de vue des savoirs en jeu. Elle peut ainsi donner les outils pour s'assurer que ce qui est évalué est bien ce qui constitue le cœur de l'enseignement.

Nous avons décidé d'aborder l'évaluation des élèves par les enseignants avec une approche didactique, dans le cas d'un développement d'outils pour les enseignants. La problématique initiale de notre travail était la suivante :

Comment peut-on aider les enseignants à évaluer la compréhension par leurs élèves

des concepts enseignés ?

Nous avons mené cette réflexion dans le cadre de l'enseignement de la mécanique de seconde. Afin d'accompagner une séquence d'enseignement existante, développée dans le cadre d'un travail de recherche en didactique de la physique, nous avons développé des tests d'évaluation. Il s'agissait d'une séquence que nous connaissions bien car elle a été l'objet de notre précédente étude (Coulaud, 2003) mais aussi d'autres travaux dans notre équipe de recherche (Küçüközer, 2000 ; Toix, 2004).

Notre travail a été effectué en collaboration avec un groupe d'enseignants et de chercheurs, dans le cadre du projet SESAMES (*Situations d'Enseignement Scientifique : Activités de Modélisation, d'Evaluation et de Simulation* , projet INRP). Ce groupe avait pour objectif de développer des outils d'aide à l'évaluation pour l'enseignant.

Afin de présenter notre travail, nous commencerons par exposer le cadre théorique qui nous a permis de poser nos questions de recherche et d'alimenter nos réflexions et notre méthodologie. L'évaluation a été abordée par de nombreuses études dans des champs de recherche autres que la didactique. Nous ferons une synthèse de ceux-ci en montrant comment ils peuvent nous aider à comprendre la fonction de l'évaluation dans la relation enseignant-élève. Nous présenterons aussi les travaux de didactique qui peuvent nous être utiles à la construction d'outils d'évaluation ciblés sur la compréhension de la mécanique. Nous essayerons enfin de faire un tour d'horizon sur la place de l'évaluation dans les études didactiques.

Nous exposerons ensuite le développement des tests que nous avons conçus pour accompagner cette séquence en nous appuyant sur les différents éléments théoriques. Après avoir exposé la méthodologie générale, nous présenterons chacun des quatre tests développés ainsi que l'analyse a priori de ceux-ci. Nous essayerons de montrer en quoi ces tests ont été réalisés pour évaluer plus particulièrement la compréhension des concepts enseignés.

La troisième partie de cette thèse sera consacrée aux résultats obtenus par l'analyse des réponses d'élèves aux différents tests développés. Il s'agira aussi de valider les résultats ainsi obtenus en nous centrant sur trois aspects : la fonctionnalité, la pertinence et la fiabilité des tests proposés.

Enfin, nous finirons l'exposé de notre travail par une brève description de la diffusion de nos outils (c'est-à-dire les tests ainsi que des résultats issus de leur analyse jugés utiles pour les enseignants). Cette diffusion étant faite par le biais d'un site Internet existant, nous présenterons la structure de ce site afin de montrer comment nous l'avons alimenté, conformément aux objectifs que nous nous étions fixés.

Partie 1 Cadre théorique

Chapitre 1 : Les pratiques d'évaluation dans les classes

1. Quelle évaluation ?

1.1. Les différents champs de recherche sur l'évaluation

Lorsqu'on essaye de faire un état des lieux des recherches sur l'« évaluation » en éducation, on se rend compte qu'il existe de nombreux types d'évaluation et de nombreuses approches théoriques. Nous essayons ici de montrer la variété des recherches afin de mieux situer notre étude. L'évaluation ne désigne notamment pas seulement l'évaluation des élèves. Nous commençons donc notre tour d'horizon par quelques exemples d'évaluation relative à l'éducation dont l'objet n'est pas les élèves puis nous considérons ensuite les travaux portant sur l'évaluation des élèves mais présentant des perspectives très variées.

Le processus d'évaluation se retrouve à différents niveaux du système éducatif. On trouve ainsi des travaux sur l'évaluation des systèmes éducatifs nationaux ou régionaux,

l'évaluation des enseignants, l'évaluation des méthodes d'enseignement. Nous évoquons ici quelques exemples de recherches sur l'évaluation des systèmes éducatifs car ce type de recherche se fait souvent par l'intermédiaire de l'évaluation des élèves. Les enquêtes internationales telles que PISA et TIMSS permettent de comparer les performances des élèves entre différents pays. Elles ont donné lieu à de nombreux rapports et articles (Beaton, 1998 ; OCDE, 1999, 2003 ; Harlen, 2001 ; Meuret, 2003). Il est important de mesurer le rôle que prennent aujourd'hui ces évaluations dans les choix des politiques d'éducation. L'efficacité du système éducatif d'un pays est essentielle. C'est pourquoi l'évaluation du système éducatif français donne régulièrement lieu à des rapports du ministère de l'Education Nationale. Les évaluations nationales telles que le bac, le brevet ou encore les évaluations d'entrée en classes de 6^{ème} ou de CE2 peuvent aussi servir à évaluer le système éducatif même si ce n'est pas leur fonction principale. Elles font l'objet d'analyses statistiques afin de dresser des bilans annuels (Bonnet, 1996 ; Levasseur, 1996). La Direction de l'Evaluation et des Prospectives édite régulièrement des notes et dossiers sur l'évaluation. L'Inspection Générale de l'Education Nationale a aussi publié un rapport des pratiques d'évaluation des enseignants français (Doml et Wieme, 1998).

Une recherche sur la littérature montre la complexité de l'évaluation des élèves, qui peut être approchée de manières diverses par différentes disciplines et nous illustrons ce point ci-dessous. Nous abordons quelques-unes de ces disciplines en donnant des exemples de recherches qui nous paraissent importantes.

En histoire de l'éducation, certaines recherches ont montré l'évolution historique de la place et de la mise en pratique de l'évaluation dans le système scolaire. Un numéro entier de la revue Histoire de l'éducation est ainsi consacré à l'examen (Belhoste, 2002). On note aussi dans ce domaine des recherches plus spécifiques comme le travail de Hulin (1992) sur le problème de physique au XIX^e et XX^e siècles.

D'un point de vue sociologique, d'autres recherches se sont intéressées par exemple aux problèmes d'équité, d'égalité et de justice, ou encore à l'influence du milieu social ou du genre dans les performances scolaires (Merle, 1998). Des thématiques telles que la fabrication des inégalités et de l'échec scolaire ont été abordées par Perrenoud (1984, 1998b).

En sciences de l'éducation, de nombreux travaux ont étudié l'évaluation. D'un point de vue philosophique, les processus d'évaluation ont été abordés par une analyse des pratiques et des intentions qui les sous-tendent (Hadj, 1990). On trouve également de nombreux travaux sur l'évaluation formative (Bloom et al., 1971 ; Allal et al., 1979 ; Perrenoud, 1998a) qui s'inscrivent dans une perspective où l'erreur n'est plus considérée comme une faute mais comme un processus normal d'apprentissage et un indicateur précieux pour l'enseignant. Nous avons aussi constaté de nombreux travaux sur les différentes modalités d'évaluation (portfolio, évaluation authentique, auto-évaluation).

Il faut également noter l'influence des travaux en psychologie expérimentale qui ont enrichi les réflexions en montrant le rôle de la motivation ou de l'estime de soi dans les performances scolaires (Lieury et Fenouillet, 1997 ; Toczec et Martinot, 2004). La psychologie expérimentale a de plus joué un rôle très important dans le développement des tests et de la « mesure » en éducation.

La docimologie (« science des examens ») s'est précisément intéressée aux questions de mesure en évaluation et à la validité de ces mesures par des études statistiques.

En didactique des disciplines, il existe assez peu de travaux sur l'évaluation. Chevallard (1986) propose une analyse didactique des faits d'évaluation. Il faut noter également les travaux de Black (1998b) qui donnent une synthèse de l'ensemble des évaluations dans le système scolaire. En didactique des sciences, les acquis des élèves ont été l'objet de nombreuses recherches en didactique de la physique notamment dans le domaine de la mécanique (Hestenes et al., 1992 ; Millar, 2003). Des tests et de problèmes d'évaluation des connaissances des élèves ont été développés ou utilisés dans le cadre de travaux sur les conceptions (Erickson, 1980 ; Shayer et Wylam, 1982 ; Closset, 1983, 1989, 1992 ; Johsua et Dupin, 1986 ; Shipstone et al., 1988 ; Méheut, 1997). Afin de mieux comprendre ce qui se passe du côté de l'élève, les travaux sur la résolution de problème (Dumas-Carré et al., 1992) et sur la représentation des problèmes (Julo, 1995) proposent une approche cognitive de l'activité de l'élève pendant l'évaluation. L'évaluation des séquences d'enseignement a aussi été l'objet de recherches en didactique de la physique (Méheut et Psillos, 2004).

Nous ne pouvons pas prendre en compte la totalité de ces approches dans notre étude et nous présentons donc dans le paragraphe suivant les limites de notre étude ainsi que les principales approches que nous retenons.

1.2. Notre approche de l'évaluation

Nous désirons avoir une approche didactique de l'évaluation au sens où nous nous intéressons à l'évaluation de la compréhension des élèves d'un contenu spécifique : l'enseignement de mécanique en classe de 2^{nde}.

Notre objectif est de produire des outils d'évaluation pour les enseignants en tenant compte de leurs pratiques. Nous ne nous intéressons pas à l'évaluation des élèves au sens large telle qu'elle peut se faire à chaque instant dans la classe mais seulement à l'évaluation écrite donnant lieu à une note. Nous avons décidé de nous concentrer sur une forme traditionnelle d'évaluation : la situation de devoir surveillé où tous les élèves de la classe ont à répondre par écrit dans les mêmes conditions (temps, lieu, moyens) aux mêmes questions écrites.

Nous utilisons bien sûr les recherches et réflexions menées sur l'évaluation afin de saisir la complexité des processus mis en jeu. Ces travaux, grâce à leur richesse, peuvent nous éclairer sur les pratiques des enseignants. Malheureusement, le manque d'études sur l'évaluation adoptant le point de vue de l'élève nous conduit à nous appuyer sur d'autres types de travaux, moins spécifiques de l'évaluation. Nous regardons notamment les travaux sur la résolution de problème.

Nous ne tenons pas compte dans notre approche de toutes les questions sociologiques de type rôle de l'origine socioculturelle ou du genre. Nous n'abordons pas les problèmes liés à l'évaluation scolaire autre que celle des élèves (évaluation du système éducatif, évaluation des enseignants, etc.) tout en restant conscients que l'évaluation des élèves va indirectement jouer un rôle dans ces évaluations. Enfin,

puisque nous avons choisi de nous pencher sur les pratiques traditionnelles telles qu'elles existent et de nous limiter à l'évaluation écrite, nous n'exposerons pas les travaux sur les alternatives possibles à ces méthodes d'évaluation (port-folio, évaluations des capacités expérimentales, etc.).

Nous présentons dans la suite de ce chapitre les différentes réflexions sur la pratique d'évaluation des élèves par les enseignants, pouvant nous guider dans l'élaboration de nos outils. Nous regardons dans un premier temps la nature et la complexité du processus d'évaluation. Nous présentons ensuite un bref exposé sur l'évolution historique de la place de l'évaluation des élèves. Les deux parties suivantes concernent les travaux menés sur l'évaluation des élèves par les enseignants, tout d'abord du point de vue des enseignants, puis du point de vue de l'élève. Nous finissons par une réflexion sur la méta-évaluation, c'est-à-dire l'évaluation de l'évaluation, en faisant le tour des méthodes de validation d'un outil d'évaluation.

2. Le processus d'évaluation

Même si notre approche se réduit à l'évaluation des élèves par les enseignants, il nous paraît intéressant de considérer dans un premier temps l'évaluation au sens large du terme, en mettant en évidence les caractéristiques communes à tout processus d'évaluation. Nous nous centrons ensuite sur certaines de ces caractéristiques pour l'évaluation des élèves par les enseignants : le caractère institué de cette évaluation, ses objets et le mode de recueil d'informations.

2.1. L'évaluation : une confrontation entre une situation observée et une situation attendue

Au sens large, Hadji définit ainsi l'évaluation (1990) :

"jugement par lequel on se prononce sur une réalité donnée en articulant une certaine idée ou représentation de ce qui devrait être, et un ensemble de données factuelles concernant cette réalité" (p.178)

Cette définition, tout en respectant la définition plus classique qu'on peut trouver dans le dictionnaire (« *Action d'évaluer, de déterminer la valeur ou l'importance (d'une chose).* », Trésor de la Langue Française Informatisé), la complète par la notion de confrontation entre une réalité et un idéal. L'adéquation entre ces deux objets aboutit à un jugement positif. L'inadéquation peut conduire à différentes conclusions : jugement négatif, absence de jugement positif, recherche de l'origine de l'inadéquation. Hadji met bien en avant cette mise en relation. L'évaluation consiste à confronter une réalité donnée à une situation désirée. Pour cela, l'évaluateur utilise, implicitement ou explicitement, des indicateurs qui lui permettent d'appréhender la réalité et de fabriquer un référent, c'est-à-dire de construire un ensemble d'éléments représentatifs de l'objet d'évaluation relativement aux objectifs d'évaluation. Ce référent est ensuite confronté à un référent, c'est-à-dire un ensemble homogène au précédent mais composé des éléments constitutifs de ce qui est souhaité. Pour construire ce référent, l'évaluateur doit fixer au préalable des normes ou des critères de jugement. Chacune de ces étapes est

dépendante de l'évaluateur. Gérard (2002) souligne à ce propos la subjectivité de l'ensemble du processus d'évaluation.

Cette analyse de l'évaluation est valable quel que soit ce qui est évalué. Dans le cas qui nous intéresse, l'enseignant doit mettre en parallèle la production de l'élève, sa réponse écrite à la question (ce qui relève donc de la réalité observable), et la réponse correcte attendue à cette question (ce qui relève de l'idéal ou du souhaité). Il va pour cela déterminer les caractéristiques de la réponse de l'élève qu'il confrontera avec la réponse qu'il attend au vu de ce qu'il a fait en classe et selon des critères dépendant de ses exigences. Selon les termes de Chevallard (1992), quand l'enseignant évalue ses élèves, il mesure, chez les élèves pris comme sujets de l'institution, le degré d'adéquation entre leur rapport personnel à un ou des objets de savoir et le rapport institutionnel à ces mêmes objets à un instant t .

2.2. L'évaluation en classe : une évaluation instituée

Si l'on reprend la terminologie proposée par Barbier (1985), l'évaluation écrite en classe est une évaluation instituée au sens où **« le jugement de valeur s'explique entièrement dans sa production comme résultat d'un processus social spécifique dont les principales étapes sont susceptibles d'observation »**. Puisqu'elle est instituée, cette évaluation doit respecter certaines règles et le processus doit présenter des étapes bien définies et systématiques. Roegiers (2004) et De Ketele et al. (1997) font référence à la définition donnée par De Ketele (1989) :

« Evaluer signifie : - recueillir un ensemble d'informations suffisamment pertinentes, valides et fiables - et examiner le degré d'adéquation entre cet ensemble d'informations et un ensemble de critères adéquats aux objectifs fixés au départ ou ajustés en cours de route, - en vue de prendre une décision. »

Cette définition a l'avantage de présenter trois étapes de l'évaluation, chacune de ces étapes pouvant être l'objet d'une analyse. La constitution du référent (le recueil d'informations) fait apparaître par exemple des questions de pertinence, de validité et de fiabilité puisqu'il est important de s'assurer que les informations recueillies permettront de prendre une décision juste et en accord avec les objectifs annoncés de l'évaluation. La deuxième étape correspond plutôt à l'évaluation telle que nous en avons parlé précédemment. Pour la troisième étape, la décision de l'enseignant se manifeste par une note, qui va servir dans la communication avec l'élève et avec les différentes institutions (conseil de classe, parents d'élèves, etc.). Tout comme Chevallard (1986), nous considérons la note comme une transaction, entre le maître et l'élève, qui permet à l'élève de se situer de manière générale dans son apprentissage et non comme une « mesure ». Nous ajoutons que le contenu du jugement de l'enseignant tel qu'il est communiqué à l'élève doit être le plus riche possible (commentaires personnalisés) pour aider l'élève à remédier à ces erreurs.

2.3. Les objets de l'évaluation

Barbier (1985) soulève la confusion qui règne parfois sur ce qui est réellement évalué : s'agit-il des copies et contenu des productions, des comportements ou des activités

développées à l'occasion de ces productions ou du niveau de capacités que révèlent ces comportements ?

Pour l'évaluation des élèves par les enseignants, il est important de noter qu'on n'évalue pas les élèves en tant que personnes. L'évaluateur infère à partir de son analyse des réponses écrites des élèves sur l'état de leurs connaissances dans une discipline à un instant donné. Il est important de noter cette part d'inférence, d'interprétation dans le processus d'évaluation et d'éviter les amalgames au moment de la production du jugement.

2.4. Le mode de recueil d'informations : le résultat d'un choix

L'évaluation scolaire orale ou écrite est un moyen de recueillir des données provoquées (Barbier, 1985) dans le sens où il s'agit de mettre les élèves dans une situation créée de toutes pièces. La question de savoir si le mode de recueil de données est pertinent se pose. Il est intéressant de voir qu'elle ne se pose pas seulement au niveau de l'enseignement primaire et secondaire mais aussi au niveau universitaire. Ainsi Hestenes (1995) remet en cause l'évaluation orale des étudiants en physique (par exemple la pratique effective de la soutenance de mémoire), qui ne permet pas selon lui de s'assurer que les candidats deviendront de « bons » physiciens.

Pour l'enseignement de la physique, plusieurs méthodes sont utilisées pour recueillir l'information permettant d'évaluer la compréhension des élèves. Les principales sont l'évaluation écrite, l'évaluation orale (allant de la simple question pendant le cours à l'examen oral) et l'évaluation des capacités expérimentales. Nous avons choisi de nous intéresser à l'évaluation écrite car elle tient une place très importante dans la pratique des enseignants et que ceux-là sont « obligés », pour des raisons institutionnelles évidentes, de pratiquer ce type d'évaluation. Cette modalité d'évaluation présente des contraintes que nous devons assumer.

Rappelons d'abord les avantages de ce type d'évaluation :

- tous les élèves répondent au test au même moment (gain de temps pour l'évaluateur) ;
- tous les élèves répondent aux mêmes questions dans les mêmes conditions (critère d'équité) ;
- les réponses des élèves représentent une trace stable de leur évaluation et peuvent être facilement archivées.
- Voici quelques inconvénients :
- l'évaluation n'est pas aussi individualisée et approfondie qu'elle pourrait l'être dans le cas d'un entretien individuel ;
- les réponses écrites des élèves, notamment à des questions ouvertes, peuvent être difficiles à interpréter et donc difficiles à noter.

Ces inconvénients sont liés à la nature de la langue écrite. Dans la langue orale, le locuteur n'a pas besoin de tout dire pour être compris. Il peut parler à demi-mot. De plus,

les rétroactions manifestées par l'interlocuteur permettent une forme de copilotage du discours. Au contraire, dans la langue écrite, tout doit être explicite. La langue écrite possède par contre des avantages du point de vue de l'organisation spatiale des informations et la possibilité de présenter l'information sous différents registres sémiotiques. Cet avantage est particulièrement intéressant dans les domaines scientifiques où les formalismes et les schémas jouent un rôle très important.

L'écrit n'est pas une simple transcription de ce qui est dit ou pensé (Vygotsky, 1997). Le langage écrit implique l'abstraction de l'interlocuteur. C'est la forme consciente d'activité verbale et intentionnelle la plus complexe et la plus difficile. Duval (2000, 2001) abonde dans ce sens en affirmant que demander à quelqu'un d'écrire est beaucoup plus contraignant que demander à quelqu'un de dire. Schoultz et al. (2001) critiquent aussi le fait que la performance des élèves aux tests écrits soit généralement utilisée comme la première source d'information pour s'assurer que les élèves ont atteint les objectifs d'enseignements fixés, en argumentant que ce qui semble parfaitement raisonnable et logique à l'oral peut parfois apparaître confus et incohérent sous forme écrite.

Le mode de recueil d'évaluation est loin d'être anodin. Il présente des avantages mais aussi des inconvénients dont il faut être conscient.

3. Quelques aspects historiques de l'évaluation scolaire

3.1. L'évolution de la place de l'évaluation dans le système scolaire

On peut considérer que les pratiques d'évaluation scolaire actuelles sont le résultat d'une évolution historique riche et complexe, prenant ses origines dans les universités au Moyen-Age (Barbier, 1985). On retiendra qu'à chaque époque les caractéristiques de l'évaluation étaient liées aux objectifs des formations scolaires aussi bien sociaux et politiques que pédagogiques. Ainsi la révolution française a joué un rôle dans la reconstruction du système scolaire français et donc par nécessité dans les modes d'évaluation associés.

Barbier souligne l'évolution au cours de l'histoire de l'objet et de la fonction des actes d'évaluation, où ce n'est plus seulement l'état final du profil des capacités présenté par un individu qui est évalué mais l'ensemble des états de ce profil tout au long de la formation considérée. C'est ainsi qu'apparaissent en France dans les années 1960 des pratiques de contrôle continu, où l'enseignant évalue régulièrement les connaissances des élèves.

3.2. L'évolution du baccalauréat

La place du baccalauréat dans l'enseignement secondaire français est centrale. Le fait que l'enseignement de physique-chimie au lycée soit sanctionné par une épreuve écrite (dans les filières scientifiques) va contraindre non seulement l'évaluation pratiquée par les enseignants de physique-chimie mais aussi leur enseignement. C'est d'ailleurs une particularité du système français. Le baccalauréat, examen national, sanctionne à la fois la fin de l'enseignement secondaire et l'accès au système universitaire. Dans les autres pays d'Europe, cette transition « enseignement secondaire / enseignement supérieur » se

fait de manière différente (Marêché, 1998).

L'enseignement de la physique a connu de grands changements (rôle de la Commission Lagarrigue) parmi lesquelles des modifications apportées aux problèmes de physique (Hulin, 1992). Le rôle de la modélisation de la situation devient plus important. Les épreuves du baccalauréat connaissent des changements : les candidats ont à répondre à plusieurs exercices afin de ne pas échouer sur un « faux départ » et ces exercices mettent plus l'accent sur la compréhension des phénomènes physiques que sur l'application numérique de formules mémorisées.

On voit donc que l'évolution de l'épreuve du baccalauréat suggère une orientation vers une mise en pratique d'une certaine « sens physique ». Cette orientation se ressent dans les programmes de physique au lycée qui prônent un enseignement plus qualitatif des phénomènes physiques afin d'en favoriser la compréhension par les élèves. Ce changement implique nécessairement un remodelage des exercices et problèmes d'évaluation associés à l'enseignement.

On voit donc que l'évolution historique montre que petit à petit les pratiques d'évaluation sont de plus en plus fréquentes (avec l'apparition du contrôle continu) et de plus en plus orientées, pour la physique, vers la compréhension qualitative des phénomènes mis en jeu.

4. L'enseignant et l'évaluation

L'évaluation occupe une place centrale dans le travail de l'enseignant.

« [L'évaluation] est une composante constante de l'activité du maître, dans sa classe, un aspect fondamental de son rôle d'éducateur, se présentant sous des formes très diverses (analyse des erreurs, recherche des sources de difficulté, présentation de corrigés, etc.), démarches naturellement bien différentes de la simple mise de notes habituelle. » (Cardinet, 1988, p.201)

Les nombreuses recherches théoriques sur la fonction de l'évaluation pour l'enseignant sont présentées afin d'éclairer l'analyse des pratiques des enseignants. Une étude des contraintes qui pèsent sur ces pratiques est indispensable à la construction d'un outil fonctionnel. Enfin, nous présentons une comparaison des tests utilisés par les enseignants et par les chercheurs dans l'objectif commun d'évaluer les acquis des élèves afin de voir ce qui peut être importé de la pratique des chercheurs.

4.1. Les différentes fonctions de l'évaluation

Nous avons vu que l'évaluation était orientée vers la prise de décision (Hadji, 1990). La nature de cette prise de décision va être déterminante dans la fonction de l'évaluation. Elle est notamment liée aux objectifs de l'enseignement et aux contraintes de l'institution.

Des travaux de recherche sur les fonctions de l'évaluation scolaire se sont développés avec l'évolution aussi bien des pratiques que des théories d'apprentissage. Ainsi a émergé une terminologie associée à ces différentes fonctions avec des termes tels que « évaluation formative », « évaluation sommative », « évaluation diagnostique ».

La notion d'évaluation formative est apparue dans le travail de Scriven (1967) à propos de l'évaluation des programmes (curricula). Elle est alors définie comme l'évaluation qui sert à déceler et à corriger les imperfections en cours de construction (De Landsheere, 1979). Suite aux travaux de Scriven, Bloom et al. (1971) ont été parmi les premiers à reprendre l'idée d'évaluation formative pour l'appliquer à l'évaluation des élèves. Bloom précise que le but, dans cette évaluation, n'est pas de noter ou de sanctionner l'apprenant mais d'aider l'apprenant et l'enseignant à se diriger vers la maîtrise. Il oppose cette évaluation formative à l'évaluation sommative, orientée vers une vérification du degré de maîtrise atteint sur l'ensemble d'un cours ou d'une partie substantielle de celui-là.

On aperçoit, parmi les travaux sur l'évaluation formative, des différences de signification même si tous s'accordent sur le fait qu'il s'agit d'une évaluation faite pendant l'enseignement et qui a comme fonction de comprendre les « erreurs » des élèves afin de rétroagir sur l'enseignement et l'apprentissage. Certains donnent une place privilégiée à l'élève dans cette évaluation formative (Allal, 1979 ; Hadji, 1990), d'autres mettent plutôt l'accent sur l'interaction en temps réel (Cardinet, 1986 ; Chastrette, 1989). Les définitions de plus en plus précises ont renforcé les limites de cette évaluation formative, creusant ainsi le fossé défini par Bloom entre les fonctions sommative et formative de l'évaluation. La différenciation de ces deux fonctions est liée à la définition accordée à chacune de celles-ci mais aussi à une vision théorique de l'apprentissage (Perrenoud, 1998a). Ainsi c'est la nature de la régulation qui va être comprise différemment par les auteurs. Certains auteurs ont adopté une définition moins stricte et considèrent que l'évaluation est formative à partir du moment où l'enseignant l'utilise en vue d'aider les élèves à apprendre (Black, 1998a ; Black et Wiliam, 1998 ; Perrenoud, 2001). Elle n'est alors plus incompatible avec la fonction sommative qui consiste à faire un bilan des acquis des élèves.

Aux fonctions formative et sommative vient s'ajouter une troisième fonction : il s'agit d'une évaluation ayant lieu avant l'enseignement et qui permet de vérifier les acquis initiaux des élèves en vue d'adapter l'enseignement. Selon Noizet et Caverni (1978), celle-ci intervient lorsque se pose la question de savoir si un sujet possède les capacités nécessaires pour entreprendre un certain apprentissage. Là encore, les définitions et même la terminologie associée va varier d'un auteur à l'autre, chaque auteur apportant quelques précisions : évaluation diagnostique (Bloom et al., 1971 ; Noizet et Caverni, 1978), évaluation pronostique (Allal, 1979), évaluation prédictive (Chastrette, 1989).

Ces fonctions ne sont pas associées à un exercice mais bien à l'objectif avec lequel l'enseignant va utiliser cet exercice. Hulin (1992) indique que, dès la première moitié du XIX^e siècle, la résolution des problèmes « sert en même temps à consacrer le savoir des élèves et à développer leur intelligence. »

De notre point de vue, cette terminologie découle d'une réflexion sur les pratiques d'évaluation mais relève plus des potentialités théoriques de l'évaluation que des pratiques concrètes des enseignants, tout du moins en France. Comme l'indiquent Noizet et Caverni (1978), si la distinction entre évaluations formative et sommative est claire sur le plan théorique, elle l'est nettement moins dans la pratique. Nous partageons ce point de vue. Notre objectif étant la production d'outils fonctionnels pour les enseignants, nous

devons également prendre en compte la pratique effective des enseignants.

4.2. Les pratiques d'évaluation des enseignants

L'évaluation tient un rôle central dans les pratiques des enseignants. Comme nous l'avons signalé, nous nous intéressons à l'évaluation écrite (devoir surveillé) pratiquée par les enseignants pour évaluer les connaissances des élèves. Cette évaluation est faite à partir des productions écrites des élèves à des exercices choisis par l'enseignant. L'enseignant va évaluer ces productions. Il en découle plusieurs actions :

il fait un bilan de l'acquisition par l'élève des concepts enseignés et donne un jugement sous forme de note et éventuellement d'appréciation sur la valeur du travail de l'élève à un moment donné, par rapport à un référent qu'il a lui-même déterminé explicitement ou implicitement ;

il l'utilise pour aider l'élève à modifier son apprentissage, dans un premier temps sous la forme d'un constat (rendu des copies qui vont éventuellement permettre à l'élève de prendre conscience de ses erreurs) et d'informations sur ce constat (commentaires présents sur les copies qui peuvent permettre à l'élève de mieux comprendre ses erreurs, de voir comment il peut s'améliorer), puis par des rétroactions sur l'enseignement (correction en classe du devoir, retour sur certains points de l'enseignement qui ont été manifestement mal acquis par certains élèves, etc.) ;

il l'utilise éventuellement pour adapter l'enseignement qui suit cette évaluation en prenant en compte les connaissances acquises et les difficultés des élèves.

Nous avons donc pris le point de vue de considérer que, lors de ses pratiques traditionnelles d'évaluation en classe, l'enseignant est amené à faire un bilan des connaissances des élèves afin de leur donner une note communicable à l'institution établissement scolaire et aux parents (ce qui correspond à une fonction sommative) puis, lors du rendu de la copie et de la correction faite en classe, à rétroagir sur l'apprentissage des élèves à partir de ces mêmes informations (ce qui correspond à une fonction formative). Cette double fonction est d'ailleurs celle de l'enseignant qui doit à la fois former ses élèves et les évaluer, et par leur évaluation évaluer la qualité de son enseignement. La difficulté de gérer cette dualité a déjà été soulignée (Cardinet, 1988).

Pour produire des outils pour les enseignants, il est fondamental de tenir compte de leur pratique tout en conservant un regard critique. Il s'agit pour nous de proposer aux enseignants un outil d'évaluation plutôt tourné vers la compréhension des élèves mais acceptable par l'enseignant. En ce sens, notre travail se rapproche de celui de Millar et Hames (2001a, 2001b, à paraître). Dans le but d'élaborer des outils pour les enseignants basés sur les résultats de la recherche en didactique, ces deux auteurs proposent un ensemble de questions « diagnostiques » qui peuvent être l'objet d'une utilisation formative ou sommative. Leur usage de « diagnostique » est très différent de ce que nous avons présenté ci-dessus. Voici un extrait de Millar et Hames (2001a) qui permet de bien saisir l'approche retenue dans ce travail :

« Here, a 'diagnostic question' is one which can provide evidence of a learner's understanding of a *specific point or idea*. A good diagnostic question [...] should tell us

how they think about [a particular 'piece' of understanding], and not just whether or not they can provide the expected answer. » (Millar et Hames, 2001a, pp.1-2)

C'est précisément ce type d'évaluation qui nous intéresse, une évaluation centrée sur la compréhension de l'élève, où chaque question interroge la compréhension d'un point précis de l'enseignement et où la réponse de l'élève peut permettre d'analyser ses difficultés. Ces questions peuvent alors servir à l'enseignant pour évaluer les acquis de ses élèves mais sont en même temps riches d'informations pour lui permettre de rétroagir sur l'apprentissage des élèves.

4.3. Les contraintes qui pèsent sur les pratiques

Les enseignants ne sont pas totalement libres d'évaluer les élèves comme ils le souhaitent. Ils ont à se plier à toute une série de contraintes liées à leur métier et au fonctionnement du système scolaire français. L'approche didactique des faits d'évaluation présentée par Chevallard (1986) expose bien le jeu institutionnel dans l'évaluation des élèves. Dans sa synthèse sur l'évaluation, De Ketele (1993) évoque un certain nombre de ces contraintes.

4.3.1. La communication avec les différentes institutions

Le conseil de classe et les autres enseignants

L'enseignant doit remettre à la fin du trimestre une moyenne pour chaque élève et une moyenne pour sa classe. Ces notes sont exposées aux autres enseignants au moment du conseil de classe. L'enseignant doit pour cela avoir effectué plusieurs évaluations afin de fournir cette moyenne. Il ne serait pas acceptable que l'enseignant ait seulement fait une évaluation qualitative pendant l'ensemble du trimestre sur chacun des élèves pour lui donner une note représentant globalement son travail, en classe et à la maison par exemple. L'enseignant n'a pas d'autre choix que de faire passer à ses élèves plusieurs évaluations écrites et notées à chaque trimestre. Cela ne l'empêche pas de tenir compte d'autres formes d'évaluation (évaluation des TP, évaluation du comportement de l'élève en classe).

Les contraintes (sociales) de la physionomie d'une classe vont aussi peser sur la notation de l'enseignant. Comme le souligne Chevallard (1986), l'enseignant doit « tenir sa moyenne » c'est-à-dire que la moyenne des notes qu'il distribue ne doit être ni trop basse ni trop haute. Une moyenne trop basse mettrait en péril la crédibilité de son enseignement alors qu'une moyenne trop haute indiquerait que la transaction a été menée à la baisse. Il est de plus souhaitable que la distribution des notes ne soit pas trop dispersée.

Les parents d'élèves

Les notes des élèves vont être utilisées pour communiquer avec les parents. L'influence des attentes des parents est non négligeable sur la pratique des enseignants.

« Puisque les parents demandent à être informés sur les performances de leurs

enfants et qu'ils aiment voir celles-ci situées par rapport aux autres enfants de la classe ou du moins par rapport à un système de référence familial qui leur permet de supputer les chances de réussite de l'année, les enseignants utilisent un système de notes qui les dispensent de justifier les contenus précis des épreuves et qui offrent certaines apparences d'objectivité » (De Ketele, 1993, p.60)

Cette influence va même aller à l'encontre de certaine innovation pédagogique en matière d'évaluation :

« Les parents [...] ne souhaitent pas de changement dans les modes d'évaluation, parce qu'ils se repèrent essentiellement aux notes. Ils ne comprennent pas ce que représentent les objectifs pédagogiques de chaque discipline. » (Cardinet, 1988, p.203)

Gilliéron (2003) souligne la nécessité de tenir compte des attentes des parents d'élèves dans l'élaboration d'une réforme de l'évaluation.

4.3.2. Le baccalauréat

On ne peut négliger l'influence du baccalauréat sur les pratiques d'évaluation (Bodin, 1997). Le baccalauréat représente l'objectif final de l'enseignement secondaire français. Il est présent à l'esprit de chaque enseignant. Dès la classe de 2^{nde}, l'élève doit se préparer à cet examen. Les contrôles continus deviennent alors un entraînement au baccalauréat et les exercices proposés respectent le type d'exercices composant l'épreuve finale.

Le baccalauréat est créé en 1808. Hulin (1992), dans son étude de l'histoire du problème de physique, indique que très vite après l'instauration d'une épreuve de physique au baccalauréat (entre 1852 et 1857) apparaît la notion de « problème type », très orienté vers une mise en équation et un traitement algébrique de la situation.

4.3.3. L'inspection et le programme officiel

Les enseignants sont eux-mêmes évalués. Un inspecteur vérifie qu'ils remplissent bien leurs fonctions. D'après ce que nous ont dit les enseignants que nous avons interrogés, les inspecteurs incitent les enseignants à consacrer 10% de leur temps à l'évaluation. De plus en plus, ils leur conseillent de faire des interrogations régulières (voire hebdomadaires) afin de s'assurer que les élèves suivent le déroulement de l'enseignement.

Le programme officiel donne peu d'information sur l'évaluation *stricto sensu* mais l'orientation générale de l'enseignement de physique est de mettre l'accent sur la compréhension qualitative de la physique plus que sur le traitement quantitatif des formules qui composent ses théories. On peut imaginer que l'évaluation est adaptée à cette orientation.

4.4. Différences entre les pratiques d'évaluation des enseignants et des chercheurs

Il est intéressant de noter que, dans les recherches en didactique, on évalue souvent les

connaissances des élèves dans une discipline, par le biais de tests papier-crayon. Il n'y a pas de travaux à notre connaissance qui abordent les différences d'évaluation entre la pratique des chercheurs et la pratique des enseignants. De tels écarts de pratiques pour évaluer les élèves nous semblent pourtant être une question intéressante : Pourquoi est-il nécessaire de pratiquer deux évaluations différentes ? Dans quelle mesure est-il possible de « transférer » les méthodes utilisées par les chercheurs dans les classes ? Millar et Hames (2001a) se sont posés les mêmes questions au moment de la production d'outils d'évaluation inspirés de la pratique des chercheurs et utilisables dans les classes anglaises.

« Here, a 'diagnostic question' is one which can provide evidence of a learner's understanding of a specific point or idea. [...] This contrasts with the kinds of questions found in many tests and examinations, and in textbooks, which require the learner to draw together different pieces of knowledge and understanding in order to provide the expected answer. With such questions, it is difficult (perhaps impossible) to diagnose exactly what a learner's difficulty or misunderstanding is when he/she does not give the expected answer. By contrast, a diagnostic question aims, so far as possible, to probe a single idea, so that the learner's response can be more easily interpreted as evidence of correct understanding, or of a specific and identifiable misunderstanding. » (Millar et Hames, 2001a, pp.1-2)

La différence soulevée ici par Millar et Hames est que, dans les tests qu'ils proposent, les questions sont suffisamment ciblées pour permettre d'identifier l'origine des incompréhensions. Au contraire, les exercices plus traditionnels (que l'on trouve dans les manuels par exemple) nécessitent l'utilisation combinée de plusieurs connaissances et il est donc difficile de repérer les difficultés de l'élève si celui-ci n'a pas donné la bonne réponse.

L'écart entre les épreuves proposées par les chercheurs et celles proposées par les enseignants se manifeste par des différences de performances comme le souligne Millar et Hames (à paraître) :

« The bibliography developed by Pfundt and Duit, listing over 6000 sources in its most recent edition (Duit 2004), gives an indication of the scale of this research effort. Several of these studies have shown that many students who obtain satisfactory or good scores on typical end-of-course assessment tests are unable to give correct answers to probes of understanding of basic ideas and concepts (Mazur 1997; Redish 2003). The two kinds of assessment instrument are measuring different things. » (Millar et Hames, à paraître, Chapter 3)

Nous présentons dans le Tableau 1-1 les quelques différences majeures qui existent selon nous entre ces deux pratiques (pour les chercheurs, nous avons considéré des tests de type questionnaires papier-crayon).

Tableau 1-1. Différences entre les pratiques d'évaluation des acquis des élèves chez les enseignants de physique-chimie et chez les chercheurs en didactique de la physique.

Pratique des enseignants	Pratique des chercheurs
Evaluation basée sur l'expérience	Evaluation basée sur des hypothèses théoriques
Dans le but de noter et d'avoir une rétroaction sur l'enseignement	Dans le but de répondre à des questions de recherche
Problèmes évaluant différentes compétences en même temps	Souvent questions courtes évaluant des aspects précis de concepts
Différents concepts évalués le plus souvent une seule fois (parfois deux)	Le même concept (ou aspect de concept) évalué plusieurs fois dans différentes situations
Différents domaines évalués, parfois même physique et chimie	Domaine évalué de la discipline délimité

4.5. Conclusion

Nous avons donc fait un tour d'horizon sur les recherches traitant des pratiques d'évaluation des enseignants. Cela nous a permis de comprendre que l'évaluation tenait une place centrale dans la relation enseignant-élèves et qu'elle était sujette à de nombreuses contraintes. Si nous voulons proposer aux enseignants un outil d'évaluation fonctionnel, il est essentiel de tenir compte de ces contraintes. Les tests utilisés par les chercheurs peuvent être une base de construction de ces outils, à condition de les adapter.

5. L'évaluation du point de vue de l'élève : la situation de devoir surveillé

Au vu des intérêts de la didactique de la physique, il ne nous semble pas possible d'aborder l'évaluation sans considérer ce qui se passe du point de vue de l'élève. Nous essayons de comprendre ici comment l'élève peut ressentir ces situations d'évaluation et quels sont les éléments que la recherche nous propose sur l'activité de l'élève pendant qu'il répond à son devoir. A notre connaissance, les travaux qui ont porté sur cet aspect de l'évaluation sont rares. C'est d'ailleurs ce que notait déjà Coppé (1998) :

« La plupart des recherches portant sur le sujet [l'évaluation des élèves] ont porté sur l'évaluation, mais, aussi paradoxal que cela puisse paraître, peu d'études ont cherché à savoir ce qui se passait vraiment pendant ce temps pour l'élève » (p.129)

Nous essayons cependant de montrer que certains travaux peuvent être utilisés dans cette approche.

Nous considérons tout d'abord que la situation de devoir surveillé est un élément central dans la négociation entre l'enseignant et l'élève. Nous montrons ensuite comment les travaux sur la résolution de problème nous permettent de comprendre l'activité cognitive de l'élève pendant qu'il répond aux questions du devoir. Le fait qu'il s'agisse pour l'élève d'une situation de démonstration écrite de ses connaissances va avoir une influence sur ses réponses. Nous finissons enfin par évoquer les contraintes pour l'élève

de la situation de devoir surveillé telles que le fait de devoir répondre en temps limité et d'être noté.

5.1. Une situation de négociation

Chevallard (1986) définit l'évaluation en classe comme une situation de négociation entre l'enseignant et ses élèves : l'enseignant doit s'assurer qu'il pilote la classe (l'ensemble des élèves mais aussi chacun des élèves) dans une progression de savoir ; le groupe d'élèves doit avancer dans cette progression. L'évaluation est un moyen de contrôle de cette progression.

Cette situation de négociation va bien sûr influencer le comportement des élèves au moment de la réalisation du devoir.

« On peut donc penser que les rapports dans lesquels s'effectue cette production d'information sont en fait liés à la perception que se font les acteurs concernés des rapports plus généraux dans lesquels s'établit l'acte d'évaluation » (Barbier 1985, p.65)

5.1.1. Le contrat

La situation de devoir surveillé est ainsi un moment particulier d'une négociation entre l'enseignant/évaluateur et l'apprenant/évalué où se prolonge le contrat établi entre ces acteurs. Ce contrat est le contrat didactique (Brousseau, 1986), qui définit les règles, parfois explicites mais le plus souvent implicites, définissant les responsabilités respectives de l'enseignant et des élèves dans la situation d'enseignement. Ce qui est évalué est ce qui est supposé être important dans l'enseignement (Joshua et Dupin, 1993). Pour réussir, les élèves ont avantage à savoir ce qui est important à apprendre et ce qui ne l'est pas.

Il faut prendre conscience que le contrat va parfois influencer la réponse de l'élève au point que celui-ci n'écrit plus sa réponse en fonction de sa compréhension mais en fonction des attentes de l'enseignant :

“students in this situation tend to write what they think the teacher wants them to write ” (Peasley, Posaen, & Roth, 1993, cité dans Mason, 2001)

5.1.2. Les attentes de l'élève

L'élève a lui aussi des attentes dans une situation d'évaluation. Il est habitué à une certaine forme d'épreuve. Une forme d'évaluation complètement innovante représente une difficulté pour l'élève voire une rupture de contrat.

« Students expect problems to be familiar » « Anything not in a familiar context, or immediately solvable with an algorithm practised in class, is considered a trick question » (Hobden, 1998, p.223)

De plus, une des particularités des questions en devoir surveillé est qu'elles ont une réponse unique (en lien avec les pratiques de l'enseignant qui doit pouvoir fournir un corrigé et justifier le cas échéant son jugement). Les élèves attendent donc des questions qui ont une unique solution, certains vont même jusqu'à penser qu'il n'y a qu'une seule méthode de résolution correcte.

5.1.3. Le devoir surveillé : une étape dans le processus d'évaluation

Comme nous l'avons vu, ce qui est communiqué à l'institution école et aux parents, c'est la moyenne du trimestre. La note au devoir surveillé n'est donc qu'une note parmi d'autres. Chevallard (1986) souligne les stratégies de l'élève afin d'obtenir un résultat qu'il juge satisfaisant à la fin du trimestre. L'investissement de l'élève au moment de la réalisation du devoir surveillé peut donc être limité. Si l'élève considère qu'il a eu suffisamment de bonnes notes dans le trimestre, il ne va pas nécessairement donner à voir tout ce qu'il sait faire, mais va se contenter de peu.

5.2. Une activité de résolution de problème

Nous donnons ici quelques illustrations des processus qui vont entrer en jeu dans la résolution du problème (ou de l'exercice) par l'élève et qui peuvent interférer dans l'évaluation des connaissances de l'élève par l'enseignant.

5.2.1. La représentation du problème

Nous nous référons principalement au travail de Julo (1995) sur les représentations de problème :

« [L'analyse des représentations dans le cas des situations de résolution de problèmes] sert surtout à décrire et, quelquefois, à mieux comprendre les conditions dans lesquelles se fait le choix d'une stratégie et son évolution ultérieure, à mieux comprendre aussi la nature des processus qui permettent d'élaborer (on pourrait dire d'inventer) une procédure de résolution, à mieux comprendre, enfin, pourquoi certaines connaissances générales comme des outils mathématiques ou des heuristiques sont mises en œuvre ou ne le sont pas. » (p.23)

Dans cette représentation des problèmes, Julo souligne l'importance de ce qu'il appelle schéma de problèmes, c'est-à-dire les **« traces laissées en mémoire par les situations rencontrées précédemment et organisées en objets structurés ayant un certain nombre de propriétés caractéristiques »**. Cette représentation conditionne le succès de la résolution et, selon Julo, l'échec n'est pas nécessairement lié au manque de connaissances mais peut être dû à une difficulté de représentation. On serait en présence d'une sous-utilisation des connaissances dont peut disposer l'individu. Il est important qu'au moment de l'interprétation d'une réponse incorrecte l'évaluateur ait en tête qu'il ne s'agit pas nécessairement d'un manque de connaissances mais qu'il est possible qu'il s'agisse d'une difficulté de représentation.

5.2.2. L'influence de la consigne

Cardinet (1988) souligne que certains enseignants s'assurent que la consigne est comprise par les élèves et sont prêts à leur donner des explications sur celle-ci afin de s'assurer que **« le résultat de l'épreuve soit bien le reflet des connaissances [...] de l'élève »** alors que d'autres considèrent que la compréhension de la consigne fait déjà partie de la compétence qu'ils souhaitent évaluer. Il souligne la difficulté du maître de

savoir si un concept est acquis ou non par un élève. Il est en effet intéressant de se demander l'influence de la consigne dans la résolution du problème. Nous pensons qu'il est important que la consigne soit la plus compréhensible possible, qu'il n'y ait pas d'ambiguïté dans les termes utilisés mais que la compréhension de la consigne par l'élève est liée à ces connaissances.

5.3. Une « démonstration » de ses connaissances

Pendant l'évaluation, l'élève doit « montrer » à l'enseignant ce qu'il sait faire, ce qu'il a retenu de l'enseignement. Il doit pour cela répondre à un maximum de questions car une non-réponse serait interprétée comme un manque de connaissance. Non seulement l'élève doit donner une réponse mais cette réponse doit aussi respecter les normes provenant du contrat didactique et des exigences du professeur (Coppé, 1993). L'élève va donc devoir tenir compte de toutes ces « règles » pour obtenir le meilleur résultat possible.

5.3.1. Un réinvestissement de ses connaissances

Puisque l'évaluation porte sur ce qui a été fait pendant l'enseignement, il s'agit, dans la plupart des cas, d'exercices mettant en jeu les concepts et lois enseignés et utilisés en classe. Il s'agit bien pour l'élève de montrer qu'il peut appliquer ce qui a été fait en classe à une situation familière ou nouvelle et non de créer de nouvelles connaissances (comme il est amené à le faire dans une activité d'enseignement).

En prenant l'exemple de l'étude du travail à la maison proposée par Johsua et Félix (2002), on peut penser que la performance des élèves est en lien avec leur façon d'importer le système didactique principal (la classe) dans le système didactique auxiliaire (la situation de devoir surveillé). Une des caractéristiques des élèves performants est la construction de liens pertinents avec les situations rencontrées en classe (Félix, 2002).

5.3.2. Une trace publique d'un travail privé

Coppé (1998) distingue deux composantes dans l'activité de l'élève dans une situation d'évaluation :

- une composante privée : les actions de l'élève pendant le devoir surveillé, ses réflexions, ses essais sont ce qu'elle nomme le travail privé ; les brouillons (si brouillons il y a) peuvent représenter une trace écrite de ce travail ;
- une composante publique dont la copie de l'élève représente la trace.

Les critères utilisés par l'élève pour savoir s'il va rendre ou non une trace publique de son travail, pour décider de ce qu'il va écrire sur sa copie sont liés aux connaissances de l'élève, à son degré de certitude face à une réponse, à l'idée qu'il se fait du contrat et des exigences de l'enseignant. Coppé (1993) distingue différents critères tels la mémoire du savoir enseigné, l'histoire de la classe, les exercices déjà rencontrés, le temps limité et les croyances.

5.4. Les contraintes de la situation pour l'élève

5.4.1. Le temps limité

L'élève n'a qu'un temps limité pour répondre aux exercices constituant le devoir surveillé. Cela peut impliquer qu'il n'ait pas le temps de répondre à l'ensemble des questions. Cela a une influence sur la copie de l'élève puisqu'une réponse peut être rendue alors que l'élève sait qu'elle est incomplète ou incorrecte. Il est aussi possible qu'une réponse connue par l'élève ne soit pas rendue (Coppé, 1993). La prise en compte par l'élève de cette contrainte de temps va éventuellement modifier l'ordre de réalisation du devoir afin de répondre à un maximum de questions dans le temps qui lui est imparti.

La limite de temps peut aussi générer un stress chez l'élève. L'élève peut alors « perdre ses moyens » et donner une réponse qu'il n'aurait jamais donnée dans une autre situation.

5.4.2. La note

Dans le cas du devoir surveillé, l'élève sait qu'il sera noté. Cela va aussi avoir une influence sur son travail puisqu'un de ses objectifs est d'avoir la meilleure note possible (Coppé, 1993). Vont alors se mettre en place des stratégies de résolution et notamment de réponses en priorité aux questions qui selon l'élève vont avoir le plus grand poids dans le barème ou au contraire par les questions qu'il sait faire pour « récolter » des points. Ces stratégies sont dépendantes de l'image que l'élève a du contrat didactique et de sa propre performance.

6. L'évaluation scolaire : entre évaluateur et évalué

L'évaluation scolaire met en jeu la rencontre de deux acteurs : l'enseignant/évaluateur et l'élève/évalué. Dans la situation d'évaluation, les deux acteurs ont des « terrains partagés ». Il s'agit des éléments publics, c'est-à-dire ceux qui sont visibles à la fois par l'élève et par l'enseignant. Ainsi le cours en classe, l'énoncé du devoir, la copie de l'élève, le corrigé sont des éléments publics. Mais il existe aussi une composante privée pour chacun des acteurs. Comme nous l'avons vu, pendant la réalisation du devoir, l'élève met en place des réflexions et des stratégies qui ne sont pas toujours visibles sur la copie. De même, l'élaboration et la correction du devoir par l'enseignant se font dans la sphère privée de celui-là.

L'objectif du schéma présenté Figure 1-1 est de regrouper ce qui se passe du côté de l'enseignant et du côté de l'élève autour du processus d'évaluation.

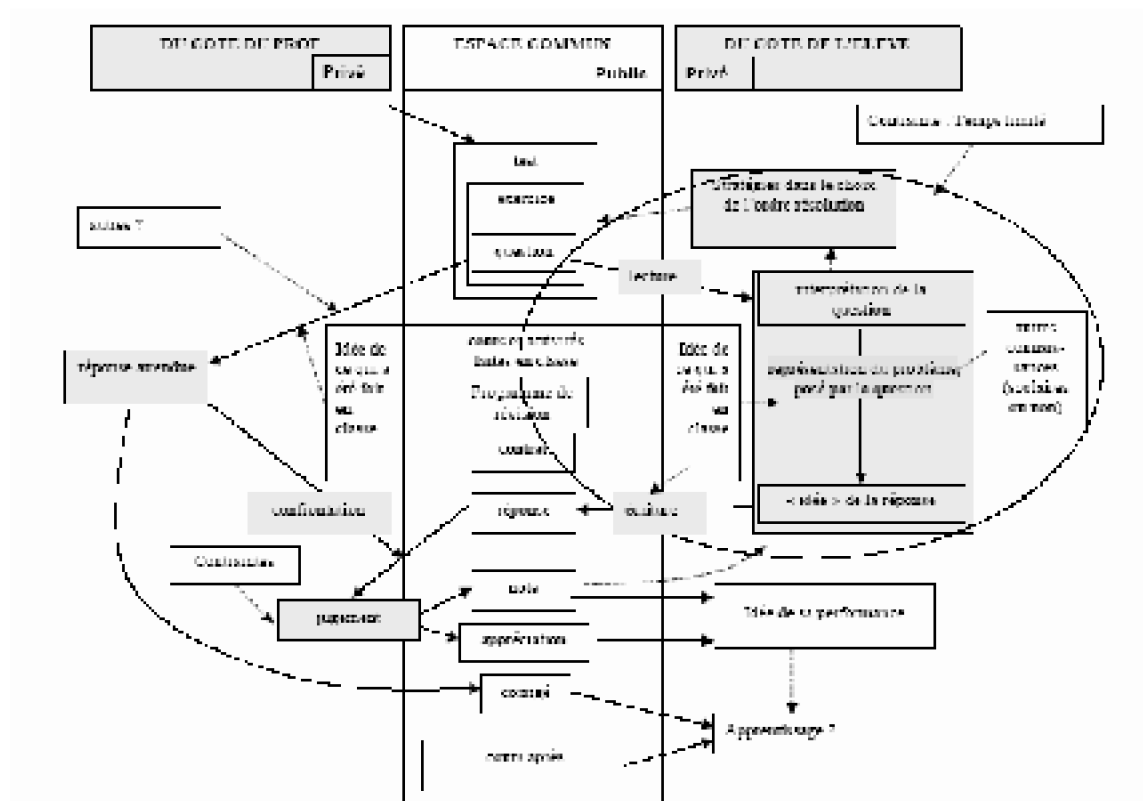


Figure 1□1. Chronologie des différentes étapes de l'évaluation du point de vue de l'enseignant et du point de vue de l'élève (les différentes étapes sont indiquées avec un fond gris, les flèches en pointillés indiquent les différentes influences)

La partie centrale regroupe les éléments partagés par les acteurs. La partie de droite représente la sphère privée de l'élève, la partie de gauche la sphère privée de l'enseignant. Nous avons tenu à préciser, dans le cas de ce qui a été fait en classe, qu'il y a une mémorisation, une sélection et une interprétation de ces éléments propres à chaque acteur. Même si l'enseignant et les élèves ont vécu les mêmes événements pendant la classe, ils n'en ont pas la même interprétation. L'enseignant pense par exemple que tel point était fondamental alors qu'il est anecdotique pour l'élève. C'est le cas pour la plupart des éléments de la colonne centrale mais cela nous semblait particulièrement important de le noter pour le cours et les activités faites en classe. Les flèches pleines indiquent la chronologie des différentes étapes du processus réalisées par chacun des acteurs (étapes indiquées avec un fond gris). Ainsi l'élève va répondre au test en choisissant l'ordre de résolution. Pour chaque question, sans pour autant considérer

un processus de résolution linéaire suggérant des étapes obligatoires, l'élève va réaliser un travail privé avant de le rendre public. L'enseignant va de son côté confronter la réponse de l'élève à la réponse attendue pour émettre un jugement et donner une note et une appréciation à l'élève. Les autres éléments présents dans le schéma représentent ce qui peut avoir une influence dans ce processus d'évaluation sur chacun des deux acteurs. Les différentes influences sont indiquées par des flèches en pointillées.

7. La validité de l'évaluation

Certains auteurs soulignent l'impossibilité de l'objectivité de l'évaluation scolaire, aussi bien dans le recueil de données que dans la détermination des indicateurs et des critères (Cardinet, 1988 ; Gérard, 2002). Cette impossibilité n'empêche pas la volonté d'améliorer la validité de l'évaluation. Dès la naissance de la docimologie (début des années 1920), on s'est interrogé sur la validité des examens (Martin, 2002).

7.1. Notions et définitions

Beaucoup de notions issues du paradigme de la docimologie sont au centre de travaux sur la validation des outils d'évaluation.

« La critique docimologique se place à l'intérieur du système des examens, admis a priori, et cherche à l'améliorer en mesurant les divergences entre examinateurs et en faisant intervenir des processus de correction de ces divergences basés sur la statistique ». (Chastrette, 1989, p.77)

La recherche de la « vraie mesure » devient alors l'objectif de ces études. Des critères tels que la fiabilité, la fidélité, la reproductibilité, la pertinence, ou encore la validité, correspondant à l'estimation de l'erreur de la mesure selon différentes sources, permettent d'apprécier la qualité d'un outil d'évaluation (Chastrette, 1989). Ceux-là correspondent à des conditions posées sur les résultats issus du traitement statistique des réponses. La théorie de la généralisabilité (Cronbach et al., 1972 ; Cardinet et al., 2003) tente d'unifier ces différentes sources d'erreur.

« Ainsi, par exemple, le score obtenu par un élève à une épreuve varie selon les questions posées, les correcteurs choisis, les moments d'évaluation, etc. » (Mokonzi, 2003)

Ces critères sont utiles à la validation d'un outil dont l'objectif est de fournir un classement des élèves ou de les situer par rapport à une norme fixée.

Si l'objectif d'évaluation est plutôt de s'assurer que chaque élève, individuellement, a compris tel ou tel concept, on trouve d'autres modes de validation. Ainsi, Black (1998b) donne un autre critère de fiabilité :

« Students' performances are so variable between different task contexts that the average over tasks must be taken to achieve even a modest level of reliability (Shavelson et al., 1993) » (p.815)

Un élève peut avoir un manque de compréhension et réussir un examen (parce qu'il maîtrise bien les règles de cet examen). Cela a été constaté par de nombreux auteurs (McDermott, 1993 ; Hobden, 1998 ; Rump et al., 2002). On peut imaginer que cet examen

reste malgré tout parfaitement adapté pour classer les élèves. Il n'est cependant pas un bon indicateur de la compréhension. La validation s'oriente alors plus vers l'analyse du contenu des questions et les procédures de résolution mises en jeu par l'élève.

7.2. Les méthodes de validation

On distingue deux méthodes de validation a posteriori (De Ketele et Gérard, à paraître) :

- une validation interne à l'épreuve où on vérifie que les résultats présentent certaines caractéristiques ;
- une validation externe où on vérifie que des résultats similaires seraient obtenus par une autre épreuve.

Pour valider un outil dont l'objectif est de classer et distinguer les élèves, de nombreux indices de validité existent. Ceux-ci correspondent majoritairement à une validation interne. Chastrette (1989) présente l'indice de facilité, c'est-à-dire le pourcentage d'élèves qui répondent correctement à la question, comme un critère de qualité d'un item de test. L'indice de facilité idéal serait ainsi situé entre 0,5 et 0,6. De même, l'indice de discrimination (différence entre les taux de réussite à un item particulier obtenus par le groupe des forts et le groupe des faibles) est un critère de qualité d'un item. La théorie de la généralisabilité fournit toute une série de traitements statistiques complexes basés sur des plans de mesure (Mokonzi, 2003) présentant les différentes sources d'erreur de mesure.

On peut cependant se demander si l'objectif de l'enseignement tel qu'il nous intéresse est vraiment de classer. C'est ce que souligne De Ketele et Gérard (à paraître) :

« Lorsqu'on utilise un test psychométrique, on s'attend à ce que la population cible soit distribuée selon une loi normale, ou courbe de Gauss [...]. Cette logique « psychologique » est déterminée par le fait que l'on souhaite décrire une population et situer un individu dans la distribution, qui semble effectivement correspondre à une courbe de Gauss. [...] La logique de l'éducation devrait donc être très différente parce qu'elle ne vise pas à décrire une population mais à agir sur elle. L'éducation scolaire a pour objectif que les élèves apprennent et que tous les élèves apprennent. La distribution attendue au terme d'un processus d'enseignement-apprentissage ne devrait donc pas – en bonne logique – être « normale », mais devrait correspondre à ce que l'on appelle une courbe en J, c'est-à-dire où il y a une majorité d'élèves qui ont acquis les objectifs fondamentaux visés et une minorité d'élèves qui n'ont pas atteint ces objectifs. » (De Ketele et Gérard, à paraître).

Pour des évaluations dont l'objectif serait donc de s'assurer que l'évalué a bien compris les concepts en jeu dans les questions qu'il a réussies, il y a beaucoup moins de travaux de référence sur la validation. Schoultz et al. (2001) ont essayé de démontrer qu'un test validé par un traitement statistique (TIMSS) n'était pas valide dans le sens où les résultats trouvés à ce même test par un autre mode d'évaluation (l'entretien individuel) étaient meilleurs de manière significative. Il s'agit donc là d'une validation externe. Nous notons cependant que pour cette étude, des indications ont parfois été données aux élèves pendant l'entretien, ce qui pourrait expliquer les meilleurs résultats de l'échantillon

considéré.

Afin de vérifier la validité de leur banque d'outils d'évaluation diagnostique, Millar et Hames (2001a) ont réalisé une étude pilote en posant quelques questions à un échantillon d'élèves puis en leur faisant passer des entretiens afin de vérifier l'interprétation faite à partir des réponses écrites. Pour s'assurer que les élèves ont compris, ces auteurs utilisent aussi la cohérence des réponses écrites des élèves à des questions considérées par les « experts » comme testant la même idée (« *basic idea* » dans le texte). Les auteurs déclarent que, pour affirmer l'acquisition d'une idée, un critère pourrait être un taux de réussite de 75% ou plus à un ensemble de dix questions (à l'intérieur d'un même test) évaluant la même idée.

Chapitre 2 : La compréhension de la mécanique

1. Réflexions générales sur compréhension et concept

Les termes « compréhension » et « concept » sont employés constamment dans la littérature mais peu d'auteurs en donnent des définitions précises ou fonctionnelles. Nous essayons ici de préciser un peu l'emploi que nous en avons, sans prétendre en donner une définition.

Il est intéressant d'avoir une définition de la compréhension qui puisse être utilisée dans le développement d'un outil d'évaluation de la compréhension. Millar et Hames (à paraître) en donnent justement une dans une étude qui présente des objectifs proches des nôtres :

« 'Understanding' cannot be directly observed; it can only be inferred from an observed performance of some kind. In science teaching, the kinds of performances we take to be indicators of understanding are the things students write or say, or in some cases their actions in response to certain stimuli (questions or tasks). The ability to answer a question, or set of questions, about topic X then provides an 'operational definition' of 'understanding of X', and perhaps also a means of measuring it on a scale that enables us to identify change and improvement. We might, of course, want to debate how good an indicator, or measure, of understanding of a topic any particular question or set of questions is, and whether the ability to respond appropriately to questions of a particular type reflects the kind of understanding we value. But the great value of having an operational definition of 'understanding of X' is that it greatly clarifies the intended learning outcomes, and puts these 'on the table', open to scrutiny and debate. » (Millar et Hames, à paraître, chapter 3)

Cette définition est pratique et opératoire. Nous la complétons à partir de nos hypothèses d'apprentissage que nous préciserons ultérieurement.

La compréhension des concepts et lois de la mécanique par l'élève est liée à la connaissance du modèle enseigné (définitions, lois, représentations ...) mais aussi à sa

mise en pratique lors de la résolution d'un problème relevant de la mécanique.

Dans la vie quotidienne, les mots « concept », « idées » et « notion » ont des définitions similaires : il s'agit d'une « *manière de concevoir, de se représenter les choses* ». En sciences, on parle plutôt de concepts lorsqu'il s'agit des éléments de base d'une théorie. On parle ainsi du concept de force et du concept de mouvement comme les éléments fondamentaux de la mécanique.

« Newtonian theory enables us to identify the basic elements in conceptualizations of motion. On one hand, we have the basic kinematical concepts of position, distance, motion, time, velocity, and acceleration. On the other hand, we have the basic dynamical concepts of inertia, force, resistance, vacuum, and gravity. We take a student's understanding of these basic concepts as the defining characteristics of his basic knowledge of mechanics. » (Halloun et Hestenes, 1985a, p.1043)

Vergnaud (1990) souligne l'importance des situations et des problèmes mettant en jeu le concept :

« Un concept ne peut être réduit à sa définition, du moins si l'on s'intéresse à son apprentissage et à son enseignement. C'est à travers des situations et des problèmes à résoudre qu'un concept acquiert du sens. » (p.135)

Vergnaud définit le concept comme un triplet :

- l'ensemble des situations qui donnent du sens au concept (la référence) ;
- l'ensemble des invariants sur lequel repose l'opérationalité des schèmes (le signifié) ;
- l'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept, ses propriétés, les situations et les procédures de traitement (le signifiant).

Il est donc important de prendre en compte les différentes représentations d'un concept, ses différentes composantes et l'ensemble des situations qu'il permet d'analyser lors de la construction de ce concept mais aussi lors de l'évaluation.

2. Quels outils la didactique de la physique nous apporte-t-elle pour évaluer la compréhension ?

Afin d'évaluer la compréhension, nous avons besoin de construire des questions pour lesquelles l'élève ait à mettre en oeuvre sa compréhension des concepts en jeu pour pouvoir répondre. La didactique de la physique a étudié l'apprentissage et la construction du sens des concepts en physique par les apprenants. De ces travaux ressortent différentes hypothèses d'apprentissage transférables dans le développement d'outils d'évaluation. Nous reprenons principalement les hypothèses ayant servi à la construction de la séquence d'enseignement sur laquelle nous souhaitons évaluer les élèves.

2.1. La modélisation

La modélisation a été l'objet de nombreux travaux en didactique : Chomat et al. (1988,

1992), Lemeignan et Weil-Barais (1988), Méheut et Chomat (1990), Martinand (1992, 2002), Gilbert et Boulter (1998). Nous avons choisi de retenir l'approche développée par Tiberghien (1994), puisqu'elle correspond à celle utilisée dans la construction de la séquence d'enseignement pour laquelle nous souhaitons développer des outils d'évaluation.

La modélisation est centrale en physique où la construction du sens des concepts nécessite des liens entre d'un côté ce qui relève du monde des objets et des événements (observables dans la situation matérielle) et de l'autre ce qui relève du monde du modèle (Tiberghien, 1994). Cette approche par la modélisation permet à la fois d'analyser le savoir en jeu et la compréhension par l'élève de ce savoir (Tiberghien, 2000).

Quand un apprenant interprète ou prédit une situation matérielle, il construit un « modèle » de la situation qui dépend de son point de vue. Cela implique la sélection des objets et des événements qui lui semblent pertinents (Tiberghien, 1994). La perspective de la modélisation permet d'interpréter certaines difficultés des élèves en termes de difficultés à établir des liens entre le monde des objets et des événements et le monde de la théorie et du modèle.

Nous considérons la capacité de l'élève à passer d'un monde à l'autre (c'est-à-dire du monde des objets et des événements au monde de la théorie et du modèle et inversement) comme un des indicateurs de sa compréhension conceptuelle.

2.2. Les registres sémiotiques

Nous avons vu qu'un concept pouvait être exprimé sous différentes représentations. La compréhension d'un concept implique l'articulation cohérente de ces différentes représentations. Duval (1993), didacticien français des mathématiques, a étudié le rôle des registres sémiotiques dans l'apprentissage d'un concept.

« La coordination de plusieurs registres de représentation sémiotique apparaît fondamentale pour une appréhension conceptuelle des objets : il faut que l'objet ne soit pas confondu avec ses représentations et qu'il soit reconnu dans chacune de ses représentations possibles. » (p.40)

Duval note l'importance de la conversion, c'est-à-dire la transformation de cette représentation en une représentation d'un autre registre en conservant la totalité ou une partie seulement du contenu de la représentation initiale. La didactique de la physique a appliqué cette théorie à l'apprentissage de la physique (Tiberghien, 2000 ; Vince et Tiberghien, 2000 ; Malafosse et al., 2001 ; Séjourné, 2001)

On retrouve cette hypothèse au niveau international. Des chercheurs en didactique de la physique ont souligné l'importance d'avoir plusieurs représentations d'un concept pour son apprentissage (Van Heuvelen, 1991 ; Van Heuvelen et Zou, 2001 ; Kozma, 2003 ; Seufert, 2003 ; Meltzer, 2005).

« Only if learners are able to construct such relations both within and between different representations can they acquire a deeper understanding and as a result be able to construct coherent knowledge structures. » (Seufert, 2003, p.228)

De nombreux travaux de didactique ont mis en avant des difficultés d'élèves liées à l'utilisation d'une représentation sémiotique d'un concept : la représentation graphique

(McDermott et al., 1987), la représentation vectorielle (Jimenez et Perales, 2001 ; Nguyen et Meltzer, 2003 ; Meltzer 2002, 2005). Meltzer (2002, 2005) a montré que le taux de réussite à des questions mettant en jeu la 3^{ème} loi de Newton (principe des actions réciproques) est significativement moins élevé pour des questions posées sous forme de schémas de vecteurs que pour des questions en langue naturelle. La difficulté peut provenir de l'utilisation du registre. Nguyen et Meltzer (2003) ont ainsi constaté que des étudiants de première année d'université aux Etats-Unis avaient encore des difficultés pour un traitement aussi simple que l'identification de deux vecteurs ayant la même intensité ou la représentation de la somme de deux vecteurs.

L'utilisation de nouveaux registres de représentation peut aussi représenter une aide à l'apprentissage de certains concepts. Pour le concept de force, par exemple, le Diagramme Système Interaction développé par Dumas-Carré (1987) et repris dans différents travaux (Jimenez et Perales, 2001 ; Savinainen, 2004) favorise l'apprentissage de la force comme une interaction.

Cette hypothèse d'apprentissage a été utilisée dans la conception de la séquence d'enseignement (Gaidioz et al., 2003 ; Buty et al., 2004). Il est intéressant de l'utiliser dans la conception des évaluations correspondantes et de vérifier que les élèves sont capables de manipuler les concepts sous différentes représentations (dans l'énoncé ou dans la réponse demandée à l'élève).

2.3. Les conceptions

Nous considérons qu'une conception est « un ensemble de connaissances ou de procédures hypothétiques que le chercheur attribue à l'élève dans le but de rendre compte des conduites de l'élève dans un ensemble de situations données » (Tiberghien et Vince, 2005). Nous avons retenu cette définition car elle met l'accent sur le fait que les conceptions sont une reconstruction du chercheur à partir de l'observation de l'élève et qu'elle regroupe sans distinction les comportements de l'élève. De plus, la définition indique que les conceptions ont un champ d'application limité (ensemble de situations données).

On trouve diverses appellations concernant les conceptions, parmi lesquelles : « alternative frameworks », « conceptions », « misconceptions », « preconceptions », « représentations ».

Beaucoup de travaux ont été menés sur les conceptions des élèves (Closset, 1983, 1989 ; Driver et al., 1985 ; Méheut et al., 1985 ; Viennot, 1998). En mécanique, on trouve de nombreuses publications qui reprennent les travaux antérieurs (Viennot, 1979 ; McDermott, 1983 ; McDermott, 1998). Nous ne retenons ici que certaines de ces conceptions, au vu du contenu en jeu dans la séquence d'enseignement.

En cinématique, la confusion entre la vitesse et la position, et encore plus fréquemment entre la vitesse et l'accélération a été observée chez de nombreux élèves, même après enseignement (McDermott, 1998).

En dynamique, de nombreux travaux ont mis en avant le raisonnement du type « le mouvement implique une force dans le sens du mouvement » (Viennot, 1979 ; Clément,

1982 ; Finegold et Gorsky, 1993 ; Palmer, 1997). Ces travaux montrent que, même après enseignement, les élèves ont encore des idées erronées en ce qui concerne le lien entre les forces et le mouvement, dont voici quelques exemples :

« Si un corps n'est pas en mouvement il n'y a pas de force qui s'exerce sur ce corps. » « S'il n'y a pas de force qui s'exerce sur un corps, ce corps est au repos ou ralentit. » « Si un corps est en mouvement il y a une force qui s'exerce dans le sens du mouvement. » « Un mouvement uniforme nécessite une force constante. » « Un mouvement accéléré nécessite une augmentation de la force. »

Une autre conception classique chez les élèves est l'existence d'une force intrinsèque à l'objet. Cette force appelée force *interne* (Vosniadou, 1994) se distingue des forces « acquises », exercées sur l'objet par des agents externes. Il existe parfois une confusion entre la force de gravité et la force interne.

McCloskey (1983) met en relation les erreurs décelées dans des réponses et la théorie de l'impetus. Il s'agit d'une théorie développée au Moyen-Age et ainsi résumée par Buridan :

« Quand une personne met un corps en mouvement elle lui communique un certain impetus, c'est-à-dire une certaine force le rendant capable de se déplacer dans la direction où la personne l'a engagé : vers le haut, le bas, sur le côté ou bien en cercle. C'est grâce à cet impetus qu'une pierre continue à se mouvoir après que le lanceur a cessé de l'accompagner. » Cette théorie est en désaccord avec la mécanique newtonienne car elle suppose que le mouvement doit avoir une cause. Le fonctionnement de certains élèves donnant des réponses « force exercée par l'agent causal même lorsqu'il n'y a plus contact » peut être rapproché de cette théorie. Nous appellerons ce type de force « force motrice ». Nous notons dans la littérature qu'il existe un débat sur ce type de rapprochement entre le développement de l'individu et l'histoire des sciences.

Certains auteurs ont essayé de comprendre l'influence des caractéristiques du problème posé sur la mobilisation par l'élève d'un modèle ou d'un autre. Viennot (1979) indique par exemple que le fait de donner le mouvement dans l'énoncé incite les élèves (fin secondaire et début universitaire) à indiquer une force ayant les caractéristiques du mouvement. Jimenez et Perales (2001) font l'hypothèse que la représentation vectorielle de la force peut être une source d'erreur puisqu'elle peut laisser l'élève penser que la force est un attribut de l'objet et que son sens correspond à celui du mouvement.

Des recherches ont été menées sur les conceptions des élèves concernant l'aspect interactif des forces. Viennot (1989) a souligné la tendance des étudiants à ne pas distinguer, au moins dans le langage, les forces exercées par un système des forces exercées sur ce système en employant la préposition « de » : la force de l'objet. Cette confusion met en place chez les apprenants une confusion sur les systèmes d'application. La tendance chez les élèves à attribuer la force au système est un obstacle à la vision de la force comme une interaction.

« Les objets « ont » de la force [...]. La loi des actions réciproques devient celle de conflits dynamiques plus ou moins équilibrés... » (Viennot, 1989, p.960)

Licht et Thijs (1990) ont mis en avant les conceptions suivantes :

- La force est associée au mouvement. Dans des situations de collision, l'objet qui bouge par rapport au sol est supposé exercer une force plus grande que l'objet immobile (exemple d'une voiture qui rentre dans un mur).
- La force est associée à la « prise d'initiative ». La personne ou l'objet qui entame l'action en appliquant une force musculaire ou par l'usage d'un moteur est supposé exercer une force plus grande que la personne ou l'objet passif. La force est attribuée à ces objets qui sont la cause des événements.
- La force est associée à la puissance. La force est vue comme une propriété inhérente de l'objet ou de la personne, et donc plus présente chez une personne forte que chez une personne plus faible.
- La force est associée à la masse. Dans des situations de collision, les objets ayant une masse plus grande sont supposés exercer une force plus grande sur des objets de plus petite masse. La masse est vue comme un agent causal.

Hestenes et al. (1992) présentent une liste des catégories des conceptions des élèves utilisés dans la construction d'un test d'évaluation en distinguant les catégories suivantes :

- Impetus : force intrinsèque qui permet aux objets de conserver leur mouvement ; incompatible avec la première loi de Newton ; le système est comme un contenant qui peut contenir une certaine quantité d'impetus.
- Force active : plus proche de la force au sens de Newton ; attribuée à des agents actifs (souvent animés) qui agissent seulement par contact direct ; les agents actifs sont des agents causaux (qui causent le mouvement, génèrent l'impetus et le transfèrent aux autres objets).
- Action/Réaction : les élèves voient l'interaction comme un conflit et donc l'agent le plus fort remporte la victoire ; principe de dominance ; incompatible avec la 3^{ème} loi de Newton ;
- Enchaînements d'influence : confusion entre le couple de forces action/réaction et deux forces opposées qui s'exercent sur le même objet.

L'ensemble des travaux sur les conceptions des élèves nous permet de prévoir et de tester certaines difficultés d'élèves. C'est un véritable outil pour la construction et l'analyse des tests d'évaluation.

2.4. La cohérence

Il existe dans la littérature un débat existant sur la cohérence de l'élève (Buty et Cornuéjols, 2002 ; Driver, 1989 ; Palmer, 1998 ; Taber, 2000). Nous faisons l'hypothèse que l'élève est cohérent de son point de vue sur un domaine limité mais qu'il va pouvoir mettre en place des comportements incohérents, du point de vue de l'observateur, selon les situations des questions auxquelles il doit répondre. Pendant l'apprentissage, l'apprenant peut utiliser des modèles mixtes (Buty et Cornuéjols, 2002). Ces modèles mixtes sont constitués en partie de connaissances anciennes et en partie des connaissances nouvellement introduites dans l'enseignement. L'apprenant donne alors

des réponses incohérentes entre elles, du point de vue de l'observateur, à un ensemble de questions. Cette incohérence peut être considérée comme un indicateur d'un apprentissage en train de se faire, d'un passage d'une théorie à une autre.

Crépault (1989) indique que lors de l'observation d'enfants et d'adolescents, on observe chez certains des profils de réponses cohérents alors que chez d'autres les profils de réponses semblent incohérents du point de vue de l'expérimentateur. De nombreux travaux ont mis en évidence des incohérences dans les réponses des élèves (Halloun et Hestenes, 1985b ; McDermott, 1993).

« However, nearly every student used some mixture of concepts ... and appeared to be inconsistent in applying the same concept in different situations » (Halloun et Hestenes, 1985b, p.1058).

Certains travaux ont montré l'influence des objets présents dans l'énoncé du problème sur la réponse des élèves (Chi et al., 1981 ; Reif, 1987 ; Finegold and Gorsky, 1991 ; Song et Black, 1993 ; Palmer, 1994, 1998 ; Mildenhall et Williams, 2001). Song et Black (1993) ont par exemple montré que les élèves trouvaient plus facilement des règles pour prédire une situation de la vie de tous les jours mais qu'ils appliquaient plus facilement leurs connaissances scientifiques à des situations scolaires. D'autres recherches ont montré que les étudiants d'un niveau supérieur donnaient des réponses plus cohérentes que des élèves de lycée, même s'il s'agissait de réponses incorrectes (Halloun et Hestenes, 1985b ; Licht et Thijs, 1990 ; Palmer, 1997).

Savinainen (2004) distingue 3 types de cohérence conceptuelle dans la compréhension qualitative de la physique : la cohérence « représentationnelle » (capacité d'utiliser correctement différentes représentations et de passer d'une représentation à une autre), la cohérence contextuelle (capacité d'appliquer un concept ou une loi physique dans divers contextes, au sens de situations proposées dans la tâche) et la cohérence « inter-conceptuelle » (« Conceptualframeworkcoherence » dans le texte original : capacité à établir correctement des relations entre différents concepts).

Meltzer (2005) a montré des incohérences « représentationnelles » chez des élèves donnant des réponses non cohérentes à des questions testant a priori la même loi (3^{ème} loi de Newton) mais mettant en jeu différentes représentations (langue naturelle ou schéma des forces).

Millar et Hames (2001a) ont étudié les cohérences des réponses des élèves de trois façons :

- analyse des réponses à des questions de types « two-tiers questions » (Treagust, 1988) ;
- analyse des réponses à différentes questions testant les mêmes conceptions ;
- analyse des réponses à la même question à quelques semaines d'intervalle.

Tous ces travaux nous indiquent que, pour évaluer les connaissances relatives à un concept, il est nécessaire de poser plusieurs questions mettant en jeu ce concept et d'analyser la cohérence des réponses données par l'élève. Pour développer ces questions, il faudra varier les caractéristiques des objets présentés dans l'énoncé et aussi

les registres de représentation dans les énoncés et les réponses demandées.

Nous avons donc mis en évidence les différentes hypothèses d'apprentissage qui peuvent être utiles à l'évaluation de la compréhension des concepts et lois enseignés. Nous les utilisons de la façon suivante :

- il est important de vérifier que les élèves savent faire des liens entre les éléments des deux mondes (hypothèse concernant la modélisation) ;
- il faut s'assurer que les élèves peuvent passer d'une représentation à l'autre d'un même concept (hypothèse concernant les registres sémiotiques ou représentations) ;
- les « erreurs » des élèves repérées dans la littérature sont une aide pour l'évaluation (hypothèse sur le rôle des conceptions) ;
- on ne peut pas se prononcer sur la compréhension d'un concept à partir de la réponse d'un élève à une seule question. De plus, une incohérence dans les réponses de l'élève peut indiquer un apprentissage en train de se faire (hypothèse concernant les cohérences des réponses).

Chapitre 3 : Evaluation en didactique

On constate dans la littérature la faiblesse, d'une part, de travaux de didactique sur l'évaluation par l'enseignant des savoirs enseignés et, d'autre part, de recherches sur l'évaluation qui prennent en compte la spécificité des savoirs en jeu (Perrenoud, 1991 ; Bodin, 1997). Cependant, par le biais de l'évaluation des acquis des élèves, de nombreux tests et réflexions se sont développés. Nous présentons ici ces tests et réflexions ainsi que les quelques travaux qui articulent didactique et évaluation.

Comme l'a souligné Perrenoud (1998), les différentes approches de l'évaluation dans les recherches sont dépendantes de la vision théorique de l'apprentissage qu'ont des chercheurs. Il est fondamental de noter que, puisque l'évaluation est intégrée dans les situations de classe, l'étude de celle-ci, et en particulier l'intégration d'outils d'évaluation dans la production d'une séquence d'enseignement, nécessite des réflexions sur les processus mis en jeu dans les phénomènes d'enseignement et d'apprentissage.

1. La place de l'évaluation dans les séquences développées

De nombreux travaux de recherches se sont penchés sur l'élaboration de séquences d'enseignement et sur la validation de ces séquences (Viennot et Ranson, 1999 ; Leach et Scott, 2002 ; Buty et al., 2004 ; Méheut, 2004 ; Méheut et Psillos, 2004). Même si, pour certaines de ces séquences, des évaluations des acquis des élèves ont été effectuées (sous la forme de pré-test et post-test par exemple), il n'y a pas à notre connaissance des ingénieries prenant en compte l'évaluation par l'enseignant. Les tests évaluant les acquis des élèves utilisés par le chercheur ne s'intègrent pas à l'évaluation pratiquée en classe. L'enseignant utilise donc une séquence issue de travaux didactiques, présentant le plus

souvent de nombreuses innovations, mais doit faire appel à des outils d'évaluations « traditionnels », loin de toutes les théories prises en compte pour la construction de la séquence. On ne peut que regretter cette absence de prise en compte de l'évaluation dans le développement des séquences car comme le souligne Feldmann et Chevallard (1986) l'évaluation est un aspect déterminant du processus didactique :

« lorsque... le didacticien tente de pénétrer dans l'histoire d'une classe, il doit se rendre à l'évidence : les faits d'évaluation qu'il peut alors y observer ne sont pas simplement un existant contingent, un mal nécessaire que l'on pourrait ignorer, mais bien l'un des aspects déterminants du processus didactique – qui règle et régule tout à la fois les comportements de l'enseignant comme l'apprentissage des élèves. » (cité par Bodin, 1997, p.53)

Nous pensons qu'il est important de pouvoir fournir aux enseignants des outils d'évaluation adaptés aux séquences développées, en utilisant les mêmes cadres théoriques de développement. Nous pouvons pour cela nous inspirer des méthodes d'évaluation utilisées par les chercheurs.

2. Les tests d'évaluation utilisés par les chercheurs

En mécanique, de nombreux travaux ont été menés afin d'évaluer les connaissances des élèves et l'efficacité de différentes méthodes d'enseignement. Le Force Concept Inventory (FCI) est un test développé par Hestenes et al. (1992) pour évaluer la compréhension par les élèves des concepts de base de mécanique. Le MechanicsBaseline Test (MBT) a aussi été développé par Hestenes et Wells (1992) et couvre un champ plus large de la mécanique, incluant notamment le traitement formel des situations. Nous considérons ici seulement le FCI car le contenu en jeu dans le MBT ne correspond pas au programme de l'enseignement qui nous intéresse. Des tests plus courts comme celui développé par Palmer (1997, 1998) sont plus centrés sur la cohérence des réponses des élèves selon la situation. Issus de travaux anglo-saxons, les tests cités ci-dessus sont constitués de questions à choix multiples. Des chercheurs portugais et français ont développé un ensemble d'épreuves pour l'évaluation des concepts en mécanique (Lopes et al., 1999) dont la forme est assez différente. Ces épreuves constituent le TECM (test d'évaluation des concepts en mécanique).

2.1. Le Force Concept Inventory

Pour le Force Concept Inventory, les auteurs se sont inspirés des travaux sur les conceptions des élèves à propos du mouvement et de ses causes. Le test est composé de 30 questions à choix multiples qui permettent de voir si les élèves sont capables de distinguer une réponse Newtonienne correcte de réponses issues du « sens commun » (« *common sense beliefs* » dans le texte). Le score d'un élève sur le test est considéré par les auteurs comme une mesure de sa *compréhension qualitative* de la mécanique.

La validité du test a été établie de quatre manières différentes.

- - prise en compte des commentaires de professeurs de physique pour l'élaboration de la version finale ;

- - vérification de l'accord sur la bonne réponse par des étudiants de physique ;
- - vérification de la compréhension des questions et des réponses proposées par des enseignants de physique ;
- - vérification de la compréhensibilité des questions par des « très bons » étudiants d'université.

La fiabilité du test a été établie en interviewant un échantillon d'étudiants ayant répondu au test et par une analyse statistique des résultats du test. Les auteurs ont observé une adéquation quasi parfaite entre les réponses écrites et orales des élèves interviewés. Ces élèves étaient de plus sûrs d'eux et pouvaient justifier leur choix. Peu d'élèves semblaient avoir répondu au hasard.

2.2. Le test développé par Palmer

Palmer (1997, 1998) a travaillé sur la cohérence des réponses des élèves pour des réponses testant le lien entre force et mouvement. Il a pour cela produit un test en utilisant des situations issues de situations « sportives ». Pour évaluer la cohérence, l'auteur a fait varier les questions selon trois dimensions : la nature de l'objet en mouvement (balle ou personne), la direction et le sens du mouvement (horizontale ou verticale vers le haut) et la vitesse du mouvement (faible, grande). Huit questions à choix multiples ont ainsi été élaborées, proposant des situations avec un objet ou une personne en train de ralentir. Pour chaque question un choix de réponse « distracteur » de type « force dans le sens du mouvement » était proposé. Il était demandé aux élèves de choisir la meilleure réponse plutôt que la réponse correcte (Tamir, 1990).

Le test a tout d'abord été validé par trois enseignants d'université. Des tests statistiques ont montré que les résultats étaient fiables et les auteurs ont vérifié l'indice de difficulté et l'indice de discrimination (voir chapitre 1).

2.3. Le Test d'Evaluation des Concepts en Mécanique (Lopes et al., 1999)

En utilisant comme cadre théorique la théorie des champs conceptuels de Vergnaud (1987, 1993, 1994) et les analyses des concepts et des activités de modélisation de Lemeignan et Weil-Barais (1988, 1993), les auteurs ont conçu un ensemble d'épreuves mobilisant différents registres de définition des concepts (au sens de Vergnaud : registre des situations, registre des systèmes de représentation, registre des représentations mentales). Deux grands types d'épreuves ont été élaborés : des épreuves qui mettent en jeu des définitions des concepts (une épreuve dite « déclarative sans contexte », une dite « déclarative avec contexte » (énoncés où une situation physique est présentée) et une épreuve inspirée de la technique des cartes conceptuelles) et des épreuves impliquant leur utilisation pour rendre compte d'une situation physique, appelant une activité de modélisation. Pour construire les épreuves déclaratives, une analyse épistémologique des concepts a été menée pour construire différents énoncés définitoires proposés aux élèves. Il est demandé aux élèves d'associer à chaque énoncé les grandeurs Force, Energie ou Quantité de mouvement. Le choix des énoncés permet d'inférer les significations attribuées aux différents concepts.

Ce test a été présenté à des élèves de collège et de lycée, à des étudiants et à des professeurs de lycée et d'université du Nord du Portugal afin de vérifier que ces épreuves étaient adaptées aux différentes catégories de sujets. Les sujets passant le test savaient qu'il s'agissait d'un travail de recherche, n'avaient pas de limite de temps et pouvaient consulter les documents qu'ils souhaitaient.

Les auteurs ont mis en évidence que les épreuves ne mesuraient pas la même chose. Ils concluent que « *l'évaluation des connaissances nécessite des épreuves diversifiées prenant en compte la complexité des concepts et de leur usage* » (p.35). De plus, leurs résultats montrent que les épreuves appelant une activité de modélisation sont les moins bien réussies.

2.4. Conclusion : utilisation possible de ces tests par l'enseignant

Nous avons donc pris l'exemple de trois tests de mécanique utilisés par les chercheurs. Nous avons vu dans le chapitre 1 que ces tests étaient différents de ceux utilisés par les enseignants et qu'il était intéressant de se demander dans quelle mesure ces tests pouvaient être intégrés à la pratique des enseignants.

Les deux premiers tests décrits ci-dessus (FCI et tests de Palmer) sont très proches : il s'agit d'un ensemble de questions à choix multiples où sont proposées aux élèves des réponses inspirées des travaux sur les conceptions. Le principal obstacle à l'utilisation de ces tests est justement qu'il s'agit de QCM. En effet, si cette forme d'évaluation est répandue et acceptée dans beaucoup de pays, les enseignants français du secondaire restent réticents à leur utilisation. On note un autre obstacle : les termes et les conventions employés dans les questions ne sont pas toujours compatibles avec ceux employés pendant l'enseignement. Cela nécessite aussi une adaptation. Cependant, les situations proposées sont parfaitement réutilisables (à condition d'adapter les questions) et présentent de plus l'avantage de servir à tester le même concept ou composante de concept dans différents contextes. Même si l'évaluation de la cohérence n'est pas habituelle chez l'enseignant, nous pensons qu'il ne s'agit pas d'un obstacle.

Les épreuves développées et utilisées par Lopes et al. (1999) ont l'avantage de présenter des types d'épreuves variées. Nous pensons que certaines, comme les cartes conceptuelles, sont trop éloignées de la pratique des classes pour être utilisées par l'enseignant. Ce travail n'a pas été repris concrètement dans le développement de notre outil mais certains aspects seraient cependant transférables et intéressants pour l'enseignant.

3. Quelques réflexions pouvant aider au développement d'outils d'évaluation

Beaucoup d'auteurs s'accordent pour dire que poser aux élèves des questions quantitatives n'est pas un moyen de s'assurer de leur compréhension (McDermott, 1993 ; Rump et al., 2002). Ces auteurs insistent sur la nécessité d'évaluer la compréhension des élèves par le biais d'exercices qualitatifs. La question des « problèmes-types » demandant aux élèves d'utiliser des algorithmes de résolution plutôt que de mettre en jeu

leur compréhension a aussi été soulevée (Dumas-Carré et Goffard, 1997 ; Hobden, 1998).

Les travaux sur la résolution de problème nous permettent de comprendre les différences qui peuvent exister entre apprenants du point de vue de la compréhension des problèmes. Les travaux de Chi et al. (1981), sur les différences dans les manières dont les experts et les novices résolvent les problèmes de physique, montrent par exemple que les novices ont tendance à catégoriser les problèmes selon des traits de surface alors que les experts font plutôt des catégories selon une « structure profonde ».

Du point de vue de l'ingénierie des tests, le travail de Julo peut nous donner des pistes pour la construction des « problèmes » d'évaluation. Nous pensons que ce travail incite à :

- proposer des exercices qui ne présentent pas une grande difficulté de représentation (et ont donc un fort taux de réussite) permettant d'accéder aux connaissances et minimisant la sous-utilisation des connaissances disponibles ;
- intégrer, dans un même devoir, des exercices testant les mêmes performances afin de voir les différences de réussite d'un exercice à l'autre ;
- découper les questions afin de mettre en avant les stratégies de résolution et éventuellement d'enrichir les schémas de problèmes de l'élève.

4. Des tests pour les évaluations internationales

Nous exposons ici un autre type de test, développé dans le cas d'une enquête internationale : PISA.

Les pays membres de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economiques), tels que l'Allemagne, le Canada, la Corée, les Etats-Unis, La France, le Japon ou encore le Mexique, ont voulu étudier les résultats de leurs systèmes éducatifs en termes d'acquis des élèves. Le Programme International de l'OCDE pour le Suivi des Acquis des élèves (PISA) a ainsi été créé en 1987. Des experts scientifiques (et en particulier des chercheurs en didactique) des différents pays se sont regroupés pour mettre au point des instruments d'évaluation, en veillant à la validité de ces instruments sur le plan international (prise en compte du contexte culturel et éducatif des différentes pays). Différents domaines d'acquisition sont évalués par ces instruments (principalement la compréhension de l'écrit, la culture mathématique et la culture scientifique) afin de déterminer si les élèves de 15 ans des différents pays sont « *préparés à relever les défis de nos sociétés modernes alors qu'ils arrivent au terme de leur scolarité obligatoire* ». Les tests se présentent sous la forme de tests papier-crayon de deux heures. Ils comprennent des items à choix multiples et des questions qui demandent aux élèves de construire leur propre réponse. Un extrait de texte décrivant une situation de la vie réelle est toujours associé aux questions. Les évaluations ont lieu tous les trois ans (2000, 2003, 2006), permettant ainsi d'obtenir une évolution des résultats au fil du temps et de varier le « domaine majeur d'évaluation ». L'évaluation de 2006 sera ainsi centrée sur la culture scientifique, à laquelle deux tiers du temps de test seront consacrés. Pour l'évaluation

2003, voici comment était définie la culture scientifique :

« La culture scientifique est la capacité d'utiliser des connaissances scientifiques pour identifier les questions auxquelles la science peut apporter une réponse et pour tirer des conclusions fondées sur des faits, en vue de comprendre le monde naturel ainsi que les changements qui y sont apportés par l'activité humaine et de contribuer à prendre des décisions à leur propos. » (OCDE, 2003, p.147)

On voit dans cette citation que l'objectif de PISA n'est pas de voir si les élèves de 15 ans sont capables de restituer les connaissances au programme mais plutôt de vérifier que ces élèves peuvent utiliser leurs connaissances scientifiques pour analyser les problèmes de société.

Pour 2003, l'évaluation de la culture scientifique s'articule autour de trois aspects : les *connaissances* ou *concepts scientifiques* (qu'on évalue en les faisant appliquer à des domaines spécifiques), les *processus scientifiques* (ensemble de savoirs et savoir-faire nécessaires pour recueillir et interpréter les faits) et les *situations* ou *contextes scientifiques* dans lesquels les connaissances et les processus sont appliqués. Ces aspects sont étudiés séparément mais sont systématiquement associés dans l'évaluation.

Parmi les thèmes scientifiques majeurs de l'évaluation 2003 de la culture scientifique figure le thème « Forces et mouvement (forces d'équilibre et de déséquilibre, vitesse, accélération, inertie) ». Les processus scientifiques sont les suivants : décrire, expliquer et prédire des phénomènes scientifiques ; comprendre les investigations scientifiques ; interpréter des faits et des conclusions scientifiques. Voici quelques exemples de champs d'application : santé, maladie et alimentation ; pollution ; utilisation de l'énergie ; transport.

L'objectif de nos outils d'évaluation n'est évidemment pas la culture scientifique mais il est intéressant de voir quelles connaissances sont considérées comme pertinentes pour ce genre d'évaluation et la façon dont elles sont présentées.

5. Des outils pour les enseignants

Même s'ils sont rares, quelques travaux de didactiques se sont orientés vers la production d'outils d'évaluation pour les enseignants. Après avoir exposé brièvement un travail réalisé en didactique des mathématiques, nous nous concentrerons sur les recherches portant sur l'apprentissage de la mécanique.

5.1. L'observatoire EVAPM : évaluation du savoir mathématique

Bodin (1997) a souhaité intégrer les questions issues du champ de l'évaluation dans le champ de la didactique des mathématiques. Un des objectifs de ce travail était de mettre à la disposition des enseignants des instruments d'évaluation validés. Des questions ont été développées pour évaluer les acquis des élèves en mathématiques de la 6^{ème} à la Terminale. Une banque d'épreuves a ainsi été constituée. La fiabilité et la fidélité de cette banque ont été analysées en comparant les résultats obtenus par des dizaines de milliers d'élèves aux résultats obtenus par d'autres études.

5.2. Des problèmes de mécanique : Projet ProPhy

Dans le livre « Rénover les activités de résolution de problèmes en physique : Concepts et démarches », Dumas-Carré et Goffard (1997) proposent aux enseignants et aux formateurs une réflexion sur les problèmes. Bien que ce travail soit centré essentiellement sur la fonction d'apprentissage de la résolution de problème, les auteurs abordent les problèmes utilisés pour l'évaluation.

« Un sujet résout un problème en utilisant les connaissances qu'il possède déjà. Etre capable de résoudre « correctement » un problème est donc une preuve que l'on possède ses connaissances ; c'est la fonction évaluation. » (p.9)

Les auteurs donnent les caractéristiques de la situation d'évaluation qui diffèrent de la résolution de problèmes pour l'apprentissage :

- les erreurs, absences de réponse ou absences d'explication sont pénalisées ;
- le temps est limité ;
- l'élève n'a aucune ressource et ne peut compter que sur « ce qu'il a dans la tête ».

Contrairement aux problèmes classiquement donnés en évaluation (situation physique présentée complètement modélisée, question posée en termes de grandeurs physiques et non de phénomènes, chemin de résolution et solution uniques), les problèmes proposés dans ces travaux sont qualitatifs et ouverts. L'optique de l'utilisation des problèmes en classe n'est évidemment pas de constituer une bibliothèque de problèmes types mais d'apprendre la physique en résolvant des problèmes. Des outils sont introduits tels que le « Diagramme Objets Interactions » (présenté dans notre deuxième partie « Production des tests », p.88) ainsi que la « bande dessinée » présentant un découpage spatio-temporel de la situation afin de faciliter cet apprentissage.

Au sujet de l'évaluation des acquis conceptuels, il est conseillé de choisir des questions qualitatives « *pour lesquels on demande explicitement les raisons, les argumentations des choix* » (p.70).

5.3. Un outil informatique : Suivi des conceptions des élèves en mécanique

Dans un travail de thèse en cours, Coppens a mis en ligne un ensemble d'exercices utilisables en classe par les professeurs (voir <http://coppens.perso.cegetel.net/suividesconceptions/>). La construction de ces exercices étant basée sur l'analyse des conceptions des élèves en mécanique, un exposé des conceptions est proposé sur le site. La réalisation des exercices se fait en ligne et l'analyse des conceptions des élèves est automatique. La méthode d'analyse est exposée et commentée. Un tableau Excel donne les conceptions repérées chez chaque élève mais aussi pour l'ensemble des élèves de la classe.

5.4. « Diagnosing pupils' understanding » : des questions pour évaluer la compréhension de la mécanique

Un ensemble très complet de questions diagnostiques a été développé par Millar (2003) autour des concepts de force et de mouvement. Ces questions ont été élaborées pour être utilisées par les enseignants dans le cadre du projet EPSE (Evidence-based Practice

in Science Education). Ce projet, mené depuis janvier 2000, a pour but d'améliorer les échanges entre les chercheurs en didactique des sciences et les enseignants. Nous nous intéressons plus particulièrement à un des axes de ce projet.

« The aim of EPSE Project 1 [...] was to explore the impact on science teachers' practices of providing them with large banks of diagnostic questions for several science domains, in a form that they could readily use in their own teaching. »

Nos objectifs sont proches de ceux de cette recherche : produire pour les enseignants un outil d'évaluation de la compréhension des élèves, en utilisant les résultats de la recherche. Les auteurs de ce travail constatent que, bien que le but de l'enseignement semble se tourner de plus en plus vers la compréhension, les pratiques d'évaluation mettent le plus souvent l'accent sur le rappel du cours. Ils souhaitent proposer une alternative à ces pratiques.

L'élaboration de la banque d'exercices a été faite en collaboration avec des enseignants. En se basant sur des exercices produits par la recherche (notamment le Force Concept Inventory), les chercheurs et les enseignants ont modifié ensemble les exercices afin d'améliorer la clarté des énoncés et de les rendre utilisables dans les classes. Millar et Hames soulignent la difficulté d'intégrer des travaux de recherche à la pratique des enseignants en précisant qu'il ne s'agit pas d'une simple implémentation mais de la création d'un nouvel artefact.

6. Conclusion

Bien qu'il n'y ait pas un véritable champ de recherche sur l'évaluation en didactique des sciences, il existe de nombreux travaux sur lesquels on peut s'appuyer.

Nous avons d'abord constaté que les séquences développées par les chercheurs ne tenaient pas compte de l'évaluation par l'enseignant, et que celui-là était contraint d'utiliser une forme plus traditionnelle d'évaluation. Cela conforte notre objectif de développement d'un outil d'évaluation des acquis des élèves pour l'enseignant cohérent avec la séquence. Nous avons ensuite vu que, bien que ne donnant pas d'outil d'évaluation à l'enseignant, les chercheurs évaluaient eux-mêmes les acquis des élèves après (et parfois avant) enseignement. Ces tests représentent une base de construction puisqu'ils sont conçus à partir de travaux de recherche. Cependant, il est nécessaire de réfléchir à la façon dont ces outils peuvent être adaptés pour les intégrer dans la pratique des enseignants français. Quelques réflexions générales issues des travaux en didactique nous permettent de trouver d'autres pistes de construction pour nos outils. Il est aussi intéressant de regarder l'élaboration des tests des acquis des élèves dans le cadre d'enquêtes internationales. PISA illustre ainsi une méthode de construction d'items d'épreuves dont l'objectif, bien que différent du nôtre, a le mérite d'être clairement défini. Nous avons aussi observé quelques outils d'évaluation produits par la recherche pour les enseignants. Le travail de Robin Millar et de Vicky Hames s'avère particulièrement intéressant dans le sens où nos objectifs et nos points de vue sont très proches.

Chapitre 4 : Questions de recherches et méthodologie

1. Questions de recherche et objectifs de développement

Comme nous l'avons précisé dans l'introduction, notre travail s'inscrit dans une démarche de recherche et développement dans le sens où nous voulons développer des outils d'évaluation pour les enseignants en utilisant des résultats issus de la recherche. Il existe aussi dans notre travail une composante « recherche », plus indépendante du développement d'outils, qui consiste à mieux comprendre le fonctionnement des élèves en situation de devoir surveillé. En effet, comme nous l'avons soulevé dans les chapitres précédents, il s'agit d'un champ de recherche peu développé. Nous n'avons pas l'ambition de répondre totalement à cette question mais nous espérons que notre travail pourra donner quelques résultats et quelques perspectives de recherche.

Pour le développement de nos outils, nous souhaitons en quelque sorte « compléter » une séquence d'enseignement développée précédemment par un instrument d'évaluation utilisable par l'enseignant. Il s'agit donc de comprendre comment des outils d'évaluation peuvent être insérés dans une séquence innovante. Pour cela nous devons répondre à différents types de questions. Nous sommes conscients qu'il ne s'agit pas ici de réelles questions de recherche mais plutôt du questionnement nécessaire au choix des bases du développement des exercices.

Sur quelles bases peut-on construire des exercices d'évaluation de la compréhension 1.
conceptuelle ?

Comment la méthodologie de développement de la séquence peut-elle être réutilisée 2.
pour le développement d'outils d'évaluation ?

Quelles sont les contraintes à respecter pour que ces outils soient acceptables par 3.
l'enseignant ?

Les questions 1 à 3 nous permettent d'introduire nos choix dans la construction des tests. Elles n'ont pas pour objectif des réponses complètes et généralisables à toute construction d'outil d'évaluation mais constituent une base nécessaire à la construction de nos tests. On trouvera principalement ces réponses dans la méthodologie de construction des outils.

Dans une ingénierie, il est essentiel de valider l'outil développé. Nous devons donc répondre aux questions suivantes :

Dans quelle mesure les outils développés s'intègrent-ils dans les pratiques 1.
d'évaluation de l'enseignant ? Comment ces outils sont-ils perçus par les élèves ?
(Fonctionnalité de l'outil)

Que peut-on dire sur la compréhension par les élèves des concepts enseignés en 2.

analysant leurs réponses écrites ? Dans quelle mesure ces outils permettent-ils d'évaluer la cohérence des élèves ? Quelles sont les analyses des réponses qui permettent de caractériser des niveaux de compréhension ? (Pertinence de l'outil)

Ces outils donnent-ils des informations cohérentes avec des informations obtenues par une autre méthode d'évaluation ? (Fiabilité de l'outil) 3.

Ces questions (questions 4 à 6) sont centrales dans notre travail. La partie « Résultats » présente les réponses à ces questions.

Comme nous l'avons indiqué, nous voulons aussi obtenir des informations sur le fonctionnement des élèves en situation de devoir surveillé. Pour cela, nous tenterons de donner des réponses aux questions suivantes :

- Quelles sont les difficultés des élèves liées à la représentation des exercices composant les tests ? Quelles peuvent être les différentes origines de ces difficultés ? 1.
- Dans quelle mesure le contrat semble-t-il influencer les réponses des élèves ? 2.
- Quel est le rôle de ce qui a été fait en classe dans les stratégies de réponses des élèves ? 3.
- Quelle est l'influence des autres questions composant le test ? 4.
- Comment l'élève choisit-il de rendre son travail public ? 5.
- Quelles sont les influences des conditions de passation du test ? 6.

Ces questions sont de natures assez variées. Certaines, comme la question 7, sont assez ambitieuses et pourraient constituer le sujet d'une recherche à part entière. Nous tenterons de donner des débuts de réponses en fin de partie « Résultats » par l'analyse d'une dizaine d'entretiens.

2. Méthodologie

La méthodologie que nous avons suivie sera abordée en détail dans les parties 2 et 3 de cette thèse. Nous abordons ici la méthodologie générale que nous allons utiliser pour répondre à nos questions de recherche en lien avec les travaux présentés dans les chapitres précédents.

Pour répondre aux questions de développement (questions 1 à 3), une analyse de la séquence d'enseignement et des méthodes de construction de cette séquence est nécessaire. En particulier, une analyse détaillée du savoir à enseigner permet de repérer les différentes composantes des concepts enseignés, d'identifier les composantes à évaluer en priorité et d'établir des liens entre ces composantes. Différentes sources d'exercices sont ensuite analysées, reprises et adaptées pour servir de base de construction. Les adaptations sont faites en tenant compte des hypothèses d'apprentissage utilisées dans la séquence, des contraintes qui pèsent sur les pratiques d'évaluation en classe (programme, contraintes de durée, fréquence d'évaluation, « culture » de l'évaluation, etc.). Une étude préalable, consistant à observer une classe pendant toute la séquence de mécanique, permet de comprendre comment ces pratiques

prennent place effectivement dans la vie de la classe, aussi bien du côté de l'élève que du côté de l'enseignant. Afin de vérifier la cohérence des réponses des élèves, il faut s'assurer que dans chaque test, les composantes à évaluer sont évaluées plusieurs fois (en prenant soin de varier les caractéristiques des situations, en termes de caractéristiques d'objets et d'événements et du type de liens demandés (modélisation, registres sémiotiques)). Afin d'analyser l'évolution des réponses dans le temps, il est nécessaire de tester certaines composantes dans différents tests afin de comparer les performances des élèves.

Nous avons ainsi développé quatre tests d'évaluation : un pour chacune des trois premières parties de la séquence et une évaluation de fin de séquence. Ces quatre tests ont été donnés dans trois classes (90 élèves). Le dernier test a été donné à 10 classes supplémentaires afin de vérifier la fonctionnalité de ce type d'outil sur un échantillon plus grand.

Nous nous assurons dans un premier temps que ces outils ne posent pas de problèmes à l'utilisation dans la classe (question 4), aussi bien du côté de l'enseignant que du côté de l'élève. Pour cela, l'observation de l'utilisation de ces tests nous permet de vérifier que l'enseignant peut les utiliser à son habitude (annonce d'un programme de révision, réalisation du test dans le temps imparti et notation de ce test pour l'ensemble des élèves). Le fait que les élèves répondent à l'ensemble des questions est une condition nécessaire de fonctionnalité. Il est important de vérifier qu'il n'y a pas de problème majeur de compréhension des énoncés. Des entretiens d'élèves post-test nous permettent pour cela de recueillir l'opinion de quelques élèves sur ces tests.

Nous avons choisi de ne pas reprendre les méthodes de validation utilisées habituellement dans les tests dont l'objectif est de discriminer, de classer les élèves puisque nos tests n'ont pas cet objectif. Cependant, les critères de validation (fonctionnalité, pertinence, fiabilité) sont important pour notre étude. Afin de valider notre outil, nous devons vérifier qu'il est pertinent pour accéder à la compréhension des concepts enseignés par les élèves (question 5). Pour cela, la méthode d'analyse des réponses doit être en accord avec la méthode de construction. Il s'agit donc d'analyser chaque composante de concept, en tenant compte des aspects modélisation et registres sémiotiques, et en croisant les performances des élèves à l'ensemble des questions évaluant d'après notre analyse les mêmes composantes. Cela nous permet de repérer les composantes pour lesquels l'élève a des difficultés et les composantes qui semblent acquises. Afin de vérifier la fiabilité de ces informations (question 6), nous avons choisi de comparer les résultats obtenus par l'analyse des réponses écrites des élèves à ceux obtenus par l'analyse d'un entretien post-test mené avec quelques élèves ayant répondu au test.

Nous avons profité de ces entretiens pour analyser le fonctionnement de l'élève en situation de devoir surveillé (questions 7 à 12).

Partie 2 Production des tests

Nous présentons dans cette partie la production des tests que nous avons développés. Il s'agit de montrer comment nous avons construit ces différents tests, en utilisant certains résultats de recherche mais aussi en tenant compte des attentes des enseignants.

Comme nous l'avons précisé dans l'introduction de cette thèse (p.4), ce travail s'est déroulé en même temps qu'un projet de recherche-développement (SESAMES) pour lequel un groupe d'enseignants de lycée et de chercheurs a réfléchi à des outils d'évaluation pour les enseignants. Nous présentons dans le chapitre 5 le contexte scientifique et humain dans lequel cette thèse s'est déroulée.

Le chapitre 6 traite des bases de la construction de ces tests, c'est-à-dire la méthodologie que nous avons utilisée pour développer ces tests. Nous exposons dans ce chapitre les différentes étapes de la production, influencées à la fois par des travaux de recherches, par les caractéristiques de la séquence d'enseignement pour laquelle nous produisons ces outils d'évaluation, et par les pratiques des enseignants.

Le chapitre 7 montre comment nous avons mis concrètement cette méthodologie en application. Pour chacune des trois premières parties de la séquence d'enseignement, nous avons développé un test de fin de partie. Nous avons aussi conçu un test « bilan » sur l'ensemble de ces trois parties. Nous présentons aussi l'analyse a priori de chacun de ces tests.

Enfin, le chapitre 8 présente brièvement l'analyse a priori de l'ensemble des quatre tests en insistant sur la possibilité de comparer les performances des élèves pour ces

tests et ainsi d'étudier l'évolution dans le temps de ces performances.

Chapitre 5 : Contexte de la recherche et de la production

1. Les projets recherche et développement du groupe COAST

Depuis 1996, le groupe COAST participe à des projets de recherche-développement. Ces projets permettent la collaboration de chercheurs en didactique et d'enseignants de collège et lycée afin de développer des outils pour les enseignants (activités d'enseignement, exercices, documents d'accompagnements, textes généraux, etc.). En utilisant la recherche comme une aide concrète, l'objectif de ces projets est de produire des documents utilisables directement par l'enseignant afin notamment d'aider les élèves dans leur apprentissage. Il s'agit de projets s'étalant sur trois années scolaires. Nous présentons ici rapidement les trois projets qui se sont succédés depuis 1996.

De 1996 à 1999, le premier projet (projet *SOC : Son Optique Chimie*) s'est constitué à l'initiative conjointe de onze professeurs de Sciences Physiques de la région lyonnaise, de quatre chercheurs en didactique des Sciences Physiques (équipe COAST) et des Inspecteurs Pédagogiques Régionaux (IPR) de Sciences Physiques de l'Académie de Lyon. Le principal objectif était de produire des activités d'enseignement de physique et de chimie en lycée, pour les parties "Son" et "Chimie" du programme de Seconde et la partie "formation des images en Optique" de la spécialité de Terminale S.

De 1999 à 2002, le deuxième projet (projet *Outils*) a permis d'élaborer des séquences d'enseignement et des documents d'accompagnement pour les nouveaux programmes de Seconde et de Première S. Ce projet était soutenu par l'INRP.

Depuis 2002, le troisième projet (projet *SESAMES : Situations d'Enseignement Scientifique : Activités de Modélisation, d'Evaluation et de Simulation*) s'inscrit dans la continuité du projet précédent. Cinq groupes travaillent au développement de documents : un groupe pour la chimie au lycée, trois groupes pour la physique au lycée et un groupe pour les mathématiques au collège. Il s'agit encore d'un projet soutenu par l'INRP.

L'ensemble des documents produits et modifiés lors de ces différents projets sont consultables sur le site de l'Académie de Lyon (<http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/sesames>).

2. Le projet contexte de notre recherche : le projet SESAMES

Ce travail a été réalisé en lien étroit avec un des groupes pour la physique au lycée du projet SESAMES. Ce groupe avait, parmi ses objectifs, celui de construire des outils d'évaluation pour les enseignants. En effet, les enseignants utilisant les séquences

élaborées lors du projet précédent (projet Outils) avaient émis la demande d'avoir des exercices d'évaluation adaptés. Il fallait donc mener une réflexion sur la fonction de ces exercices et sur les travaux de recherche qui pourraient être utiles à un tel développement.

Dans un premier temps, les membres de ce groupe ont construit, en s'inspirant des outils produits lors du précédent projet, des exercices liés à la séquence de mécanique de Seconde. Pour cela, les connaissances et savoir-faire exigibles inscrits au Bulletin Officiel de l'Education Nationale ont été analysés et complétés par des connaissances et savoir-faire liés à la séquence. A chaque exercice ont été associées les informations suivantes :

- les objectifs de l'exercice ;
- des commentaires sur le savoir en jeu dans l'exercice ;
- les connaissances et savoir-faire testés pour chaque question ;
- le corrigé de l'exercice.

Une deuxième partie du travail de ce groupe a été consacrée à l'élaboration d'outils d'évaluation plus transversaux.

Le projet SESAMES ne représente pas seulement un projet annexe auquel nous avons participé. Il est un véritable contexte, humain et scientifique, pour notre travail. La première année de ce projet (2002-2003) fut l'occasion de réfléchir à l'élaboration d'exercices en profitant des connaissances théoriques des chercheurs et de l'expérience des enseignants. Cette double orientation, générée dans ce cadre, a été une préoccupation constante pour notre travail. Les enseignants du groupe ont su nous rappeler sans cesse les contraintes qui pesaient sur leur métier et ainsi nous aider à construire des outils fonctionnels. Ils ont testé les exercices et outils associés dans leur classe. Cela nous a permis d'observer une utilisation concrète d'outils liés à l'évaluation (voir p.67, étude préalable).

Notre travail aurait eu une tout autre forme sans ce groupe. Ce projet a été pour nous un moyen d'échanger sur nos idées, de profiter de l'expérience d'autres chercheurs mais surtout d'enseignants. Les outils développés par ce groupe sont de plus à la base d'une grande partie de notre travail.

2.1. La séquence de mécanique

2.1.1. Une séquence issue d'un projet de recherche

Notre travail s'appuie sur la séquence de mécanique élaborée lors du projet Outils. Cette séquence est destinée aux enseignants de Seconde souhaitant une alternative aux cours traditionnels tout en respectant les contenus exigibles au programme officiel. Les bases de ce travail sont présentées dans Buty et al. (2004). Les références théoriques utilisées pour la construction de la séquence (cf. cadre théorique) sont une véritable source pour le développement de nos tests. Elle représente un cadre de construction : elles sont en ce sens une contrainte mais proposent en même temps une aide, un guide. Les éléments de

ce cadre repris dans notre étude seront présentés et illustrés plus loin. Nous décrivons ici brièvement le contenu de cette séquence.

2.1.2. Présentation de la séquence

Cette séquence correspond à la partie du programme « L'univers en mouvement et le temps ». Les auteurs ont décidé d'un découpage en 5 grandes parties (ou chapitres) :

- **Partie 1 : Décrire un mouvement avec un modèle.** Cette partie est basée sur un modèle du mouvement introduisant le point représentant l'objet dont on étudie le mouvement, la trajectoire, la vitesse, la caractérisation du mouvement et le référentiel.
- **Partie 2 : Interactions et Forces.** Cette partie introduit le concept de force comme modélisation de l'action en passant par l'intermédiaire des interactions entre systèmes. Elle présente aussi le principe des « actions réciproques ».
- **Partie 3 : Lois de la mécanique.** Cette partie présente les lois de la mécanique pour permettre à l'élève de faire les liens entre les forces et le mouvement. Ces lois sont quatre formes dérivées du « principe d'inertie ».
- **Partie 4 : Loi de l'interaction gravitationnelle.** Cette partie introduit la force gravitationnelle, ses caractéristiques et présente un rappel sur le poids.
- **Partie 5 : Le temps.** Comme son nom l'indique, cette partie diffère des quatre précédentes puisqu'elle aborde autour de phénomènes périodiques les notions d'amplitude, de période et de fréquence.

Pour le développement de nos tests, nous nous sommes intéressés aux Parties 1, 2 et 3, qui forment un tout cohérent. En effet, sont introduits dans ces trois parties le concept de mouvement, celui de force et les lois qui permettent de relier ces concepts. Nous avons choisi de ne pas inclure les éléments de la partie 4 pour lesquels il s'agissait plus d'évaluer les calculs de force que la compréhension des concepts en jeu.

Chapitre 6 : Bases de la construction des tests

1. Indications sur les pratiques des enseignants français

Nous avons précisé que nous voulions développer des tests fonctionnels pour les enseignants. Il est pour cela nécessaire d'étudier les pratiques d'évaluation des enseignants français. Nous nous limitons ici aux caractéristiques principales des pratiques d'évaluation des enseignants de physique-chimie au lycée.

1.1 La forme de l'évaluation

Les enseignants de physique au lycée sont habitués à un certain type d'évaluation. Pour

répondre aux contraintes de l'institution scolaire, les enseignants évaluent leurs élèves par écrit afin de mettre tous les élèves dans les mêmes conditions (critère d'égalité). De plus, ils ont ainsi une trace de leur évaluation en cas de contestation du jugement émis.

Comme le souligne le rapport « l'évaluation des élèves en classe : ses effets sur l'enseignement et son utilité pédagogique ; sa contribution à la progression des apprentissages » (Doml et Wieme, 1998), les pratiques d'évaluation observées peuvent être très variées mais les pratiques traditionnelles sont largement dominantes :

« ... l'évaluation en classe demeure traditionnelle, quasi rituelle dans sa répétitivité avec l'interrogation orale et le devoir écrit comme piliers incontournables du système évaluatif. » (p.14) « L'écrit en classe, qu'on appelle interrogation écrite, test, devoir surveillé, etc., est la forme d'évaluation par excellence quand elle n'est pas exclusive. » (p.16)

En prenant pour modèle l'épreuve du baccalauréat, les enseignants donnent à leurs élèves des devoirs écrits, souvent constitués de questions de cours et de problèmes et exercices à résoudre. Les questions posées doivent avoir une réponse unique (que l'enseignant donnera lors de la correction du devoir).

Nous devons donc tenir compte de ces contraintes. Il est bien sûr possible de prendre quelques libertés. Nous avons par exemple choisi d'introduire de nombreuses questions fermées (style QCM), en nous inspirant des tests utilisés en recherche. Il est important d'être conscient qu'un enseignant français ne peut accepter, pour des raisons culturelles essentiellement, un test entièrement constitué de QCM pour évaluer sommativement ses élèves. Il faut donc que nos tests présentent des questions ouvertes. De plus, nous considérons que les questions ouvertes permettent d'avoir accès à la "libre expression" des idées des élèves.

1.2. Le contenu de l'évaluation

Les enseignants donnent à leurs élèves un programme de révision pour chaque devoir. Ce programme doit être en lien avec le programme officiel et doit contenir des questions abordées en cours. Il s'agit d'une situation de réinvestissement des connaissances.

Il faut donc que nos tests demandent un réinvestissement de ce qui a été fait en classe.

1.3. Le moment et la durée de l'évaluation

Les problèmes de temps sont fondamentaux dans les pratiques d'évaluation. Le plus souvent, le devoir arrive à la fin de l'enseignement d'un ensemble de concepts qui constituent un tout cohérent (à la fin d'un chapitre par exemple). Un devoir peut évaluer le contenu de plusieurs chapitres, mêlant parfois chez certains enseignants des exercices de physique et de chimie. Cela est lié en partie au manque de temps de l'enseignant (de nombreux enseignants souhaiteraient plus de temps pour faire l'enseignement demandé au programme). Les observations faites semblent montrer que les enseignants de physique-chimie passent 7 à 13% de leur temps à évaluer (en tenant compte des corrigés en classe des devoirs écrits). Les discussions que nous avons eues avec les enseignants nous indiquent une moyenne de 3 devoirs par trimestre, mais le rapport IGEN de 1998

semble notifier de grosses différences de pratiques d'un enseignant à l'autre. Il n'y a pas de directives officielles, mais les enseignants sont invités à faire des évaluations régulièrement.

La durée du devoir est définie au préalable. Les élèves sont prévenus du temps qu'ils auront pour répondre aux questions. On distingue deux types :

- L'évaluation courte, de 5 à 30 minutes ;
- L'évaluation longue, de 50 minutes à 2 heures.

Plusieurs contraintes se mêlent alors :

- des contraintes pratiques : l'enseignant utilise la plupart du temps les plages horaires de ces enseignements pour donner les devoirs. Afin que tous les élèves répondent en même temps et ne puissent se passer les questions, les heures de classe entière sont utilisées. Celles-ci correspondent dans la plupart des cas à des tranches de 55 minutes ;
- des contraintes de « tradition » : en Seconde, la durée typique d'un devoir est d'une heure. Les élèves peuvent exceptionnellement avoir à répondre à des devoirs de deux heures (devoir commun à toutes les classes de Seconde du lycée par exemple).

2. Etude préalable

Après l'étude des pratiques des enseignants français, il était important de voir comment ces processus d'évaluation se déroulaient effectivement en classe. Nous avons donc choisi d'observer une classe de Seconde. Cette observation, effectuée de janvier à juin 2003, nous a permis de voir comment s'articulaient cours et évaluation, des points de vue de l'enseignant et de l'élève. De nombreuses données ont été recueillies. Après une présentation de la nature de ces données, nous exposerons les conclusions que nous en avons tirées.

2.1. Présentation de l'étude

Nous sommes allés dans une classe de Seconde d'un lycée lyonnais afin de nous familiariser avec les pratiques d'évaluation du côté de l'enseignant et principalement du côté des élèves. Nous avons ainsi suivi quatre élèves pendant tout l'enseignement de mécanique, soit plus de quinze heures en classe. Leur professeur de physique participait, avec le groupe SESAMES, à l'élaboration des exercices et utilisait la séquence de mécanique produite par le groupe Outils.

Puisque nous voulions comprendre comment l'évaluation prenait place naturellement dans une classe, nous avons décidé de ne pas trop intervenir. Par exemple, l'enseignante décidait seule de la constitution des devoirs. Nous l'avons interrogée par la suite pour comprendre la raison de ses choix.

2.1.1. Les différents devoirs surveillés

Dans la classe étudiée, trois devoirs surveillés (DS) ayant des exercices relatifs à l'enseignement de la mécanique ont été donnés. Un axe chronologique (Figure 6-1) présente les différentes étapes de l'enseignement de mécanique et les différents moments d'évaluation.

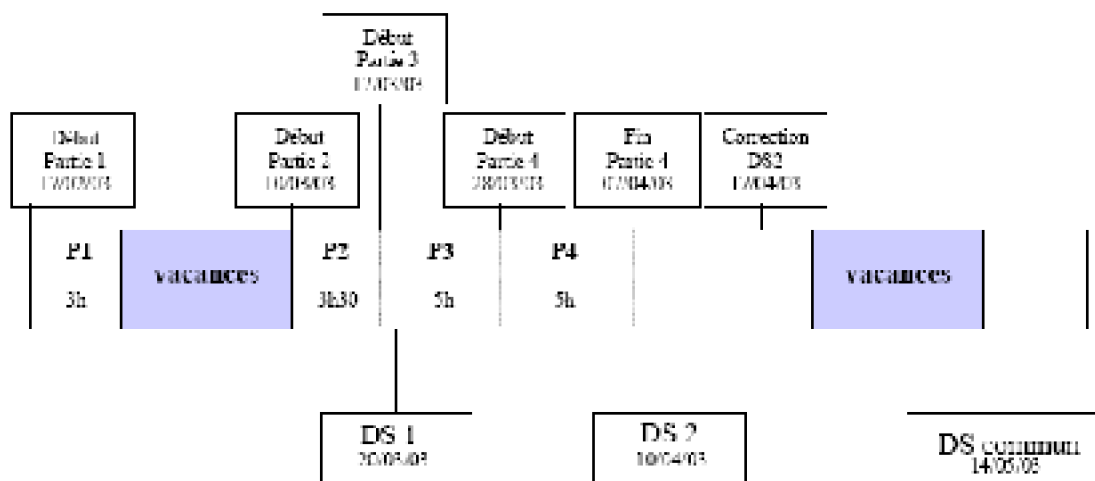


Figure 6-1. Axe chronologique de l'enseignement de mécanique de la classe de 2^{nde} étudiée.

Le DS 1 était un devoir d'une heure. Il comportait six exercices : trois exercices de chimie et trois exercices de mécanique. Les exercices de mécanique portaient sur la partie 1 et sur le début de la partie 2. La date de ce devoir et le programme de révision correspondant avaient été annoncés le 10 mars (soit 10 jours avant) et rappelés pendant le cours précédant le devoir (le 17 mars). L'enseignante a rendu ce devoir aux élèves le 28 mars et leur a demandé de préparer la correction pour le cours suivant (31 mars). Pendant ce cours, après avoir vérifié les corrections, l'enseignante a corrigé les exercices au tableau.

Le DS 2 était un devoir d'une heure. Il comportait uniquement des exercices de mécanique (quatre au total), qui portaient sur l'ensemble des quatre parties enseignées. La date de ce devoir et le programme de révision correspondant avaient été annoncés le 28 mars (soit treize jours avant). Ce devoir a été corrigé en classe le 17 avril.

Le DS commun était un devoir réalisé par l'ensemble des élèves de seconde du lycée. Il s'agissait d'un devoir de deux heures comportant trois exercices de chimie, un exercice d'optique et deux exercices de mécanique. Nous n'étions pas présents lors de l'annonce du devoir. L'enseignante a procédé à une correction des exercices de mécanique en deux temps : elle a corrigé le premier exercice le 30 mai et le deuxième le 2 juin.

2.1.2. L'observation des élèves

Les quatre élèves que nous avons observés travaillaient systématiquement par binôme (deux par deux). Nous les avons filmés pendant tout l'enseignement et avons ainsi recueilli 16h30 de vidéo pour chaque binôme. Nous leur avons demandé de remplir une grille chaque semaine afin d'avoir des informations sur le travail relatif à cet enseignement

et effectué en dehors des heures de cours. Nous avons photographié leurs productions écrites produites en classe et à la maison ainsi que leur réponse aux trois devoirs surveillés. Après chaque devoir surveillé, nous avons interviewé ces élèves afin de mieux comprendre leurs réponses écrites.

2.1.3. Une observation complémentaire : un questionnaire aux enseignants

En plus de cette étude de cas, nous avons fait passer un questionnaire (cf. Annexes) à quelques enseignants afin de voir s'ils avaient utilisé les exercices et documents associés produits par SESAMES. Ce questionnaire reprenait chacun des exercices et demandait à l'enseignant s'il avait utilisé ou non cet exercice, en précisant le contexte de passation de l'exercice et les résultats obtenus s'il avait choisi l'exercice ou en justifiant le non-choix de celui-ci.

2.2. Conclusions tirées à partir des données

2.2.1. Du côté de l'enseignant : la préparation du devoir

L'ensemble de ces données nous a permis d'avoir dans un premier temps un aperçu des contraintes lors du choix des exercices composant un devoir surveillé. Nous avons observé dans la classe étudiée que l'enseignant s'assurait de tester par ces exercices les points les plus importants de son enseignement. On retrouve ce résultat dans la réponse au questionnaire d'une autre enseignante.

« J'effectue ma propre liste de connaissances et de savoir-faire à tester pour chaque partie. Ensuite je cherche des exercices (je lis différents énoncés) qui permettraient de tester ces connaissances. »

L'enseignante de la classe étudiée prenait aussi en compte la durée totale laissée aux élèves pour répondre au devoir afin de constituer un devoir ni trop court ni trop long. Elle donnait aux élèves le programme de révision au moins une semaine avant. Cependant le programme de révision pouvait comprendre la semaine précédant le devoir.

2.2.2. Du côté des élèves : lien avec le contenu de l'enseignement

Les données vidéos recueillies et analysées nous ont permis de prendre conscience du lien entre ce que les élèves faisaient en classe (et donc indirectement le contenu de la séquence) et leur réponse aux tests. Les élèves s'attendent à un exercice proche de ceux qu'ils ont faits en classe. Cependant, nous avons noté chez certains élèves interviewés la difficulté à faire le lien lors de la réalisation du devoir entre l'exercice posé en évaluation et l'exercice fait en classe. Nous illustrons cette difficulté pour un exercice du DS1 sur le mouvement. La Figure 6-2 présente l'énoncé de cet exercice.

Un cycliste se déplace en ligne droite à vitesse constante par rapport au chemin sur lequel il se déplace. Proposer une représentation de la trajectoire d'un point de la selle et caractériser le mouvement de ce point :

- le référentiel étant le vélo ;
- le référentiel étant le chemin.

Figure 6□2. Enoncé d'un exercice donné lors du DS 1.

Pour répondre aux questions posées, certains élèves ont fait immédiatement le lien avec l'exercice du cours le plus proche (voir Figure 6-3).

Un vélo roule tout droit à la vitesse constante de 20 km/h par rapport au chemin sur lequel il se déplace.

a) Caractériser le mouvement du point situé au milieu du guidon :

- le référentiel étant le vélo,
- le référentiel étant le chemin.

b) On étudie le mouvement de la valve d'une roue du vélo. Citer un référentiel par rapport auquel ce mouvement est circulaire. Utiliser le modèle du mouvement pour justifier votre réponse.

Figure 6□3. Enoncé d'un exercice réalisé en classe avant le DS 1.

Parmi les élèves interviewés, on remarque qu'un élève en difficulté fait référence à un autre exercice fait en classe :

« ben parce que on avait fait un exemple en classe et euh c'était avec un train et on avait pris le train et le paysage et justement c'était pas la même chose »

Lorsque cet élève se représente le problème, il ne fait pas appel à l'exercice le plus pertinent pour répondre. Dans l'exercice sur la mouche, on demandait aux élèves de décrire le mouvement d'une mouche dans un TGV et de donner la vitesse de cette mouche afin de leur faire comprendre qu'il est nécessaire de préciser le référentiel. Bien sûr, cet exercice ressemble à celui donné en DS mais il demande un transfert plus grand que l'exercice présenté Figure 6-3 où la situation est la même (vélo en mouvement rectiligne uniforme sur un chemin, description du mouvement dans le référentiel vélo et dans le référentiel chemin).

Cette observation est une illustration du rôle de la représentation du problème et des schémas de problèmes (Julo, 1995, cf. cadre théorique) dans la réponse de l'élève.

2.2.3. Une difficulté : la catégorisation des réponses écrites des élèves

Nous avons aussi éprouvé de la difficulté à catégoriser les réponses écrites des élèves. En effet, les exercices proposés par SESAMES aux enseignants comportaient beaucoup de questions ouvertes, certaines mêlant parfois plusieurs objectifs.

Trajectoire d'un projectile

Sur la glace d'une patinoire, on enregistre le mouvement d'un palet retenu par un fil accroché à un point fixe A. Deux positions successives sont séparées par un intervalle de temps constant. Les palets tournent dans le sens des aiguilles d'une montre.

1. Décrire le mouvement du palet présenté sur le schéma ci-contre.
2. On admet que le poids du palet et la force exercée par la glace sur le palet se compensent. Montrer, en utilisant le principe d'inertie, qu'il existe au moins une autre force agissant sur le palet, préciser laquelle et la représenter sur le schéma lorsque le palet est en P.
3. Si le fil casse, quel sera le mouvement ultérieur du palet ? Justifier la réponse à l'aide du principe d'inertie.
4. Le fil casse quand le palet occupe la position repérée par la lettre B, représenter la chronophotographie qui serait obtenue, en complétant le schéma.
5. Si l'on ne néglige plus les frottements, représenter :
 - a. la chronophotographie qui serait obtenue ;
 - b. le diagramme palet-Interaction ;
 - c. le schéma des forces exercées sur le palet.

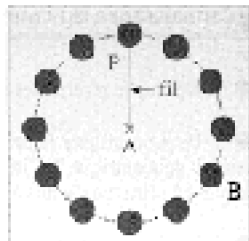


Figure 6□4. Enoncé d'un exercice du DS commun.

Par exemple, pour la question 2 de l'exercice présenté Figure 6-4 et portant sur l'ensemble des trois parties, la réponse attendue est la suivante :

On voit sur la chronophotographie que le mouvement est circulaire donc la direction du mouvement varie. D'après le principe d'inertie, si la vitesse et/ou la direction du mouvement d'un système varient alors les forces qui s'exercent sur ce système ne se compensent pas. Puisque la force exercée par la Terre (poids du palet) et la force exercée par la glace sur le palet se compensent, il y a forcément au moins une autre force.

Il s'agit de la force du fil puisque le fil et le palet sont en contact. Voici sa représentation :

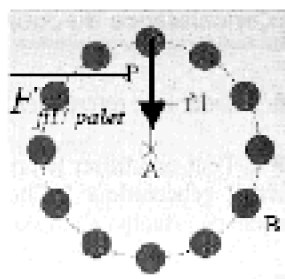


Figure 6□5. Exemple de réponse correcte attendue pour l'exercice.

On voit que cette question est multiple. Voici quelques réponses écrites d'élèves (on se contente ici de la partie en langue naturelle) :

- élève B : « D'après le principe d'inertie, il y a la force qu'exerce le fil sur le palet ».
- élève M : « Il y a aussi la force de la Terre qui agit sur le palet. »
- élève N : « Si la direction ou la vitesse qui s'exerce sur le système ne varie pas on dira que les forces qui s'exercent sur le système se compensent. Ici c'est la force du fil exercée sur le palet »
- élève O : « Si la vitesse et ou la direction d'un mouvement ne change pas, on dira

que toutes les forces se compensent. Or la direction du palet étant circulaire, elle change tout le temps. C'est pourquoi une autre force qui s'exerce sur le palet est nécessaire : c'est la force que le fil accroché au point A exerce sur le palet qu'il manque »

On voit, sur ces quatre réponses, la diversité des réponses et la difficulté de catégoriser celles-ci.

Cela nous a incité à nous inspirer des tests utilisés dans la recherche souvent faits pour pouvoir effectuer cette catégorisation. Ces tests utilisent notamment beaucoup de questions ciblées et/ou fermées.

2.2.4. Conclusion

Cette étude préalable a été riche d'informations. Elle nous a permis de bien nous imprégner de la séquence de mécanique telle qu'elle est pratiquée dans une classe, aussi bien du point de vue de l'enseignant que de celui des élèves. Elle nous a aussi permis de nous familiariser avec les pratiques d'évaluation, en recueillant des données et en discutant avec les différents acteurs (évaluateur et évalués). Elle nous a enfin permis de construire les bases de notre outil à partir des contraintes de ces pratiques mais aussi en tenant compte de l'analyse que nous voulions faire (catégorisation des réponses).

3. Les tests et exercices existants

Comme nous l'avons indiqué dans les conclusions de notre étude préalable, nous avons réalisé que les exercices développés dans le groupe SESAMES ne nous permettaient pas de catégoriser les réponses des élèves facilement. Nous avons donc analysé les tests utilisés en recherche.

3.1. Le Force Concept Inventory

Le Force Concept Inventory (FCI) développé par Halloun et Hestenes (1985a) est un test qui a pour objectif l'évaluation des connaissances liées au concept de force et au repérage des croyances des apprenants sur les phénomènes physiques associés. Ce test ainsi que les articles associés à son développement sont consultables en ligne (<http://modeling.asu.edu/R&E/Research.html>). Les auteurs ont aussi développé le Mechanics Baseline Test (Hestenes and Wells, 1997). Cependant, le MBT s'intéresse aux concepts de la mécanique qui nécessitent un formalisme mathématique. Au vu du programme officiel, nous n'avons pas pris le MBT comme test de référence.

Pour le FCI, les auteurs ont décidé d'analyser la compréhension des concepts de base de mécanique. Ils ont pour cela effectué une analyse du savoir à évaluer lors de l'élaboration de leur test :

« La théorie newtonienne nous permet d'identifier les éléments de base dans la conceptualisation du mouvement. D'un côté, nous avons les concepts de base de la cinématique tels que la position, la distance, le mouvement, le temps, la vitesse et l'accélération. D'un autre côté, nous avons les concepts de base de la

dynamique tels que l'inertie, la force, la résistance, le vide, et la gravité. Nous considérons la compréhension par l'élève de ces concepts de base comme les caractéristiques définissant ses connaissances de base en mécanique. » (Halloun et Hestenes, 1985a, p.1043)

Le développement de ce test est principalement fondé sur une analyse des connaissances initiales des élèves en mécanique et sur les conceptions que ceux-ci ont sur le mouvement. Ils font notamment appel aux travaux sur les conceptions des élèves en mécanique. Le test a été développé afin de repérer ces conceptions.

Voici les principales conceptions abordées par ce test :

- l'impetus, force intrinsèque qui permet aux objets de conserver leur mouvement, incompatible avec la première loi de Newton, où le système est comme un contenant qui peut contenir une certaine quantité d'impetus ;
- la force active : plus proche de la force au sens de Newton, attribuée à des agents actifs (souvent animés) qui agissent seulement par contact direct ; les agents actifs sont des agents causaux (causent le mouvement, génèrent l'impetus et le transfèrent aux autres objets) ;
- le principe d'Action/Réaction : les élèves voient l'interaction comme un conflit et donc l'agent le plus fort remporte la victoire (principe de dominance) ; confusion entre le couple de forces action/réaction et deux forces opposées qui s'exercent sur le même objet.
- Les questions posées sont majoritairement des questions à choix multiples pour lesquelles les réponses proposées permettent de classer l'élève dans une catégorie. Les auteurs proposent une organisation des items selon la conception associée (cf. Figure 6-6).

Table II. A Taxonomy of Misconceptions Probed by the Inventory. Presence of the misconceptions is suggested by selection of the corresponding Inventory Item.

	Inventory Item
0. Kinematics	
K1. position-velocity undiscriminated	20B,C,D
K2. velocity-acceleration undiscriminated	20A, 21B,C
K3. nonvectorial velocity composition	7C
1. Impetus	
I1. impetus supplied by "hit"	9B,C; 22B,C,E; 29D
I2. loss/recovery of original impetus	4D, 6C,E; 24A, 26A,D,E
I3. impetus dissipation	5A,B,C; 8C; 16C,D; 23E; 27C,E; 29B
I4. gradual/delayed impetus build-up	6D, 8B,D; 24D; 28E
I5. circular impetus	4A,D; 10A
2. Active Force	
AF1. only active agents exert forces	11B; 12B; 13D; 14D; 15A,B; 18D; 22A
AF2. motion implies active force	29A
AF3. no motion implies no force	12E
AF4. velocity proportional to applied force	25A; 28A
AF5. acceleration implies increasing force	17B
AF6. force causes acceleration to terminal velocity	17A; 25D
AF7. active force wears out	25C,E
3. Action/Reaction Pairs	
AR1. greater mass implies greater force	2A,D; 11D; 13B; 14B
AR2. most active agent produces greatest force	13C; 11D; 14C
4. Concatenation of Influences	
C11. largest force determines motion	18A,E; 19A
C12. force compromise determines motion	4C; 10D; 16A; 19C,D; 23C; 24C
C13. last force to act determines motion	6A, 7B, 24B; 26C
5. Other Influences on Motion	
CF. Centrifugal force	4C,D,E; 10C,D,E
Ob. Obstacles exert no force	2C, 9A,D; 12A, 13E, 14E
Resistance	
R1. mass makes things stop	29A,B; 23A,B?
R2. motion when force overcomes resistance	28B,D
R3. resistance opposes force/impetus	28E
Gravity	
G1. air pressure-assisted gravity	9A; 12C; 17E; 18E
G2. gravity intrinsic to mass	5E; 9E; 17D
G3. heavier objects fall faster	1A; 3B,D
G4. gravity increases as objects fall	5B; 17B
G5. gravity acts after impetus wears down	5D; 16D; 23E

Figure 6□6. Analyse des items du test en lien avec les conceptions abordées (Halloun et Hestenes, 1992).

In the figure at right, student "a" has a mass of 95 kg and student "b" has a mass of 77 kg. They sit in identical office chairs facing each other.

Student "a" places his bare feet on the knees of student "b", as shown. Student "a" then suddenly pushes outward with his feet, causing both chairs to move.

During the push and while the students are still touching one another:

- (A) neither student exerts a force on the other.
- (B) student "a" exerts a force on student "b", but "b" does not exert any force on "a".
- (C) each student exerts a force on the other, but "b" exerts the larger force.
- (D) each student exerts a force on the other, but "a" exerts the larger force.
- (E) each student exerts the same amount of force on the other.

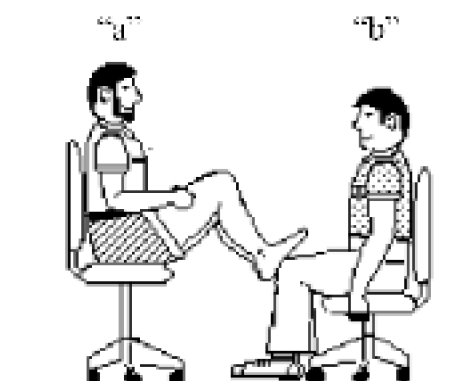


Figure 6□7. Exemple de question du FCI.

Par exemple, pour la question présentée Figure 6-7, la proposition B correspond à la conception AF1 « only active agents exerce force », la proposition D correspond à AR1 « greater mass implies greater force » et à AR2 « most active agent produces greatest force », alors que la proposition E correspond à la conception admise en physique et l'utilisation de la troisième loi de Newton.

Nous avons donc utilisé ce travail d'élaboration d'un instrument d'évaluation des concepts de base de mécanique pour construire nos tests.

3.2. Diagnosing Pupils' Understanding

Le travail de Millar (2003) dans le cadre du projet *EPSE* (*Evidence-informed Practice in Science Education*) est inspiré en partie du FCI. Ces chercheurs ont développé une banque d'outils pour l'évaluation diagnostique de la compréhension des élèves en mécanique. Cette banque permet de repérer avant l'enseignement les connaissances et les difficultés des élèves.

Cette banque d'exercices est composée de six ensembles de questions :

- **1. Identifier des forces** : il s'agit de questions où l'on demande aux élèves d'identifier des forces dans quelques situations de la vie quotidienne, et de légender celles-ci pour distinguer l'agent qui exerce la force de l'objet sur lequel elle est exercée.
- **2. Lien entre force et mouvement** : il s'agit de questions sur la relation entre force et mouvement, en essayant de tester en particulier le fait que la résultante des forces est liée à un changement dans le mouvement, et qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une force pour maintenir un mouvement rectiligne uniforme.
- **3. Frottements** : questions explorant la compréhension des élèves des frottements, considérés comme une force qui se produit en réponse à une force externe appliquée, et "s'adapte" à cette force appliquée jusqu'à une certaine limite (pour un

objet et une surface donnés).

- **4. Gravité et chute libre** : il s'agit de questions évaluant la compréhension de comment et pourquoi les choses tombent, et de la différence entre la masse et le poids.
- **5. Actions réciproques : Troisième loi de Newton** : toutes les forces sont le résultat d'une interaction, toujours sous la forme de deux forces égales et opposées s'exerçant sur les deux objets mis en jeu dans l'interaction. Les questions évaluent la compréhension par les élèves de ces paires de forces et du fait qu'elles sont de même intensité indépendamment des tailles ou des mouvements des objets interagissant.
- **6. Décrire le mouvement** : il s'agit de questions sur les idées de vitesse (moyenne et instantanée) et d'accélération, et sur l'utilisation de graphes mettant en relation la distance et le temps, la vitesse et le temps pour présenter des informations sur le mouvement de l'objet.

Nous nous sommes directement inspirés de certaines des situations proposées dans ce test (situations parfois communes avec celles proposées dans le FCI). Nous avons eu la possibilité de rencontrer à plusieurs reprises Robin Millar et de profiter de son expérience en matière d'évaluation.

3.2.1. Utilisation de ce type de tests

Comme l'ont souligné Millar et Hames (2001b), très peu de questions peuvent être utilisées telles quelles sans être modifiées. Nous avons donc utilisé certains des items des tests du FCI ou de Millar en les adaptant. La particularité de ces items est qu'il s'agit dans la plupart des cas de questions à choix multiple. La pratique des QCM n'est pas très répandue dans les classes françaises. Cependant, nous avons décidé de conserver cette méthode de questionnement qui permet de proposer des items « distracteurs » inspirés des travaux sur les conceptions ou des grandes catégories de réponses des élèves à des questions ouvertes (Tamir, 1998).

3.3. Autres sources d'exercices existants

3.3.1. Les exercices développés par SESAMES

Comme nous l'avons précisé, les exercices développés dans le projet SESAMES ont été à la base de notre travail. Même si la forme de certains exercices ne convenait pas à l'analyse que nous voulions faire, les situations proposées avaient été choisies à la lumière des hypothèses de recherche et de l'expérience des enseignants. Ces exercices étaient de plus adaptés à la séquence. Nous nous sommes donc souvent inspirés de ceux-ci, en apportant les modifications nécessaires.

3.3.2. Les problèmes de ProPhy

Le travail effectué par Dumas-Carré et Goffard (1997) sur la résolution de problème en

mécanique a aussi été une aide dans la construction de nos exercices. L'objectif de ces problèmes n'était pas l'évaluation des connaissances des élèves mais plutôt l'utilisation de problèmes pour l'apprentissage de la mécanique. Cependant, l'analyse du savoir et les réflexions sur les propriétés des problèmes ont été aussi utiles au développement de nos tests.

3.3.3. La banque d'évaluation du ministère

La direction de l'évaluation et de la prospective propose une banque d'outils d'aide à l'évaluation diagnostique (<http://www.banquoutils.education.gouv.fr/>). Il s'agit d'outil pour aider les enseignants à :

- **« apprécier, par une analyse des réponses des élèves, leur degré de maîtrise de la compétence évaluée,**
- **les conduire plus loin dans leurs acquisitions en explorant les pistes pédagogiques suggérées. »**

Voici les outils relatifs à l'enseignement de mécanique en Seconde qu'on peut trouver sur ce site :

Déterminer les mouvements relatifs

A partir de trois définitions pour le mouvement relatif et d'un schéma montrant des personnages sur un tapis roulant, l'élève doit compléter un tableau indiquant les mouvements relatifs ou l'immobilité des personnages les uns par rapport aux autres.

Masse, poids, reconnaître ce qui est constant

Quatre documents sont mis à la disposition de l'élève : un texte sur la gravitation et trois tableaux (relation masse-poids ; constance de la masse quand on change de planète ; poids d'un objet sur différentes planètes). L'élève doit répondre à différentes questions sur la masse et le poids d'un objet afin de montrer qu'il a bien compris ce qui est constant et ce qui varie.

Distinguer actions de contact ou à distance

Deux schémas illustrent la différence entre action de contact et action à distance. L'élève doit compléter un tableau représentant différentes situations afin de montrer qu'il sait faire la différence entre les types d'action.

Comparer des forces

Un texte définit les caractéristiques d'une force. Un schéma montre comment est représentée une force. A partir de ces informations l'élève doit entourer des flèches ayant des caractéristiques données ou citer les caractéristiques de la force représentée.

Rubriques proposées pour chaque exercice : Nature de l'activité, Conditions de passation, Composantes évaluées, Pré requis (Compétences et/ou connaissances non évaluées mais nécessaires), Origine des supports non créés par les concepteurs, Consignes de passation pour le professeur, Commentaires, Types de réponses et codages, Suggestions pédagogiques.

Il est particulièrement intéressant de voir comment ces outils sont construits, quelles sont les rubriques associées, en particulier les suggestions pédagogiques selon les réponses des élèves. On trouvera ces documents en Annexes.

4. Analyse du contenu en termes de concepts

Une étape essentielle de notre travail consiste à analyser le savoir en jeu dans la

séquence. En effet, comme nous l'avons précisé dans le cadre théorique, il est nécessaire d'étudier en finesse la nature des savoirs à évaluer pour s'assurer que les outils d'évaluation sont adaptés.

La théorie de la transposition didactique (Chevallard, 1985) nous permet d'analyser les changements subis par le savoir en jeu dans l'enseignement de mécanique. Pour cela, nous avons choisi de présenter en premier quelques points de la mécanique classique (que nous appellerons « le savoir savant »), puis le contenu du programme officiel relatif à ce savoir (que nous appellerons « savoir à enseigner ») et enfin le contenu de la séquence d'enseignement relatif à ce savoir (que nous appellerons aussi « savoir à enseigner » mais qui a subi des transformations par rapport au programme officiel).

4.1. La mécanique classique

[coulaud_m_mecanique_classique.pdf](#)

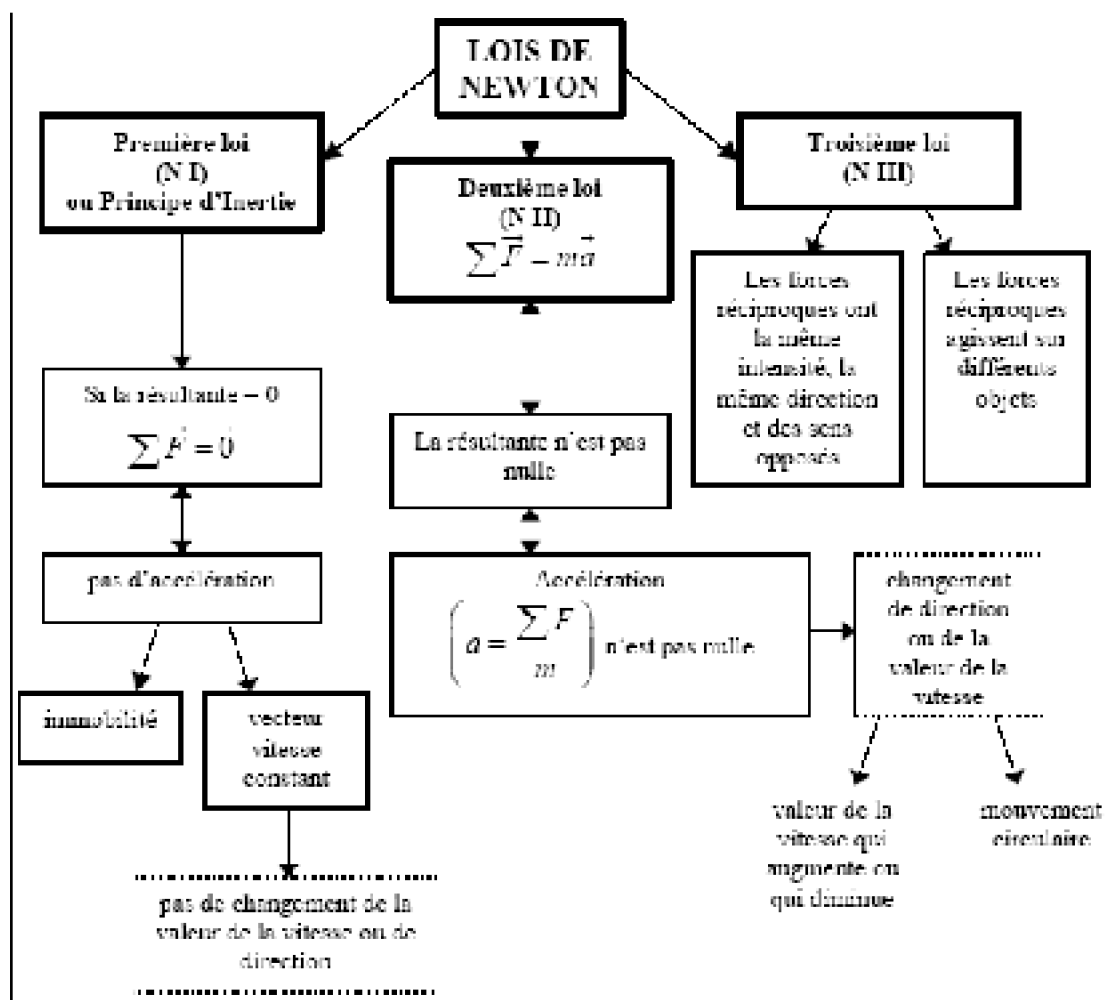


Figure 6□8. Les lois de Newton et leurs caractérisations (traduit de Savinainen, 2004,

p.52). (cf. pdf)

4.2. Le Programme Officiel

Le contenu de l'enseignement de la mécanique au lycée correspond à la mécanique classique newtonienne. Au moment du baccalauréat, d'après le programme officiel, un élève de Terminale S doit pouvoir entre autres :

- Choisir un système. Choisir les repères d'espace et de temps ;
- Faire l'inventaire des forces extérieures appliquées à ce système ;
- Enoncer les trois lois de Newtons.
- C'est dans cette dynamique que le programme de Seconde introduit quelques bases de mécanique. Cependant, la classe de Seconde étant une classe dite « générale », le contenu du programme est adapté afin d'aborder ces notions selon un point de vue plutôt qualitatif. Nous allons étudier ici le contenu du programme actuel de la mécanique en classe de Seconde en essayant de mettre en évidence les principales transformations effectuées à partir du « savoir savant ».
- « Cette partie est structurée autour de 3 notions qui s'articulent dans une progression logique : - la relativité de tout mouvement : le mouvement d'un objet n'a de sens que par rapport à un autre objet pris comme corps de référence, - le principe d'inertie, - l'utilisation heuristique du principe d'inertie pour la mise en évidence de forces, et en particulier de la gravitation universelle. » (B.O. n°6, 1999, p.20)

CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR FAIRE EXIGIBLES
1.1. Relativité du mouvement	Décrire le mouvement d'un point dans deux référentiels différents.
1.2. Principe d'inertie	
1.2.a. Effets d'une force sur le mouvement d'un corps Rôle de la masse du corps	Savoir qu'une force s'exerçant sur un corps modifie la valeur de sa vitesse et/ou la direction de son mouvement et que cette modification dépend de la masse du corps.
1.2.b. Enoncé du principe d'inertie pour un observateur terrestre : "tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les forces qui s'exercent sur lui se compensent"	Enoncer le principe d'inertie. Savoir qu'il est équivalent de dire : "un corps est soumis à des forces qui se compensent" et "un corps n'est soumis à aucune force".

Tableau 6□1. Extrait du programme officiel (BO n 6, 12 août 1999, hors-série) relatif à la Partie « L'Univers en mouvement et le temps ».

Nous voyons donc ici la sélection des éléments de la mécanique newtonienne pour l'élaboration du programme. Seules sont retenues la relativité du mouvement, l'utilisation de la première loi de Newton et l'expression de la force de gravitation. Il n'est pas fait mention de la troisième loi de Newton.

Le détail du programme nous permet de voir les transformations subies par les éléments sélectionnés :

- Pour la relativité du mouvement, le texte indique que le référentiel est considéré

comme un objet par rapport auquel on étudie le mouvement d'un autre objet. Il n'est pas attaché de repère à ce référentiel et on ne parle pas de vecteur position. La notion d'accélération n'est pas au programme. On parle de variation de vitesse et/ou de direction.

- La première loi est préservée, le principe d'inertie est explicitement au programme.
- La deuxième loi de Newton est présente dans cette connaissance exigible :

« *Savoir qu'une force s'exerçant sur un corps modifie la valeur de sa vitesse et/ou la direction de son mouvement et que cette modification dépend de la masse du corps.* »

Contrairement à la deuxième loi de Newton, il ne s'agit pas de la résultante des forces mais seulement de l'effet d'une force. Le vecteur accélération est présent par l'intermédiaire de la modification de la vitesse ou de la direction du mouvement. L'influence de la masse est précisée. Cette formulation ne nécessite aucun recours à la forme vectorielle.

4.3. La séquence d'enseignement

Voici le texte d'introduction à la séquence de mécanique proposée aux enseignants par les auteurs :

Cette séquence a été développée pour permettre à l'élève de comprendre les concepts mis en jeu dans le programme. On voit dans ce texte différentes références qui ont pesé sur ce passage du programme à la séquence :

- le programme officiel de Seconde ;
- les connaissances préalables des élèves et le programme de collège ;
- les difficultés des élèves déjà connues ;
- le choix d'introduire des « feuilles modèles » (hypothèse d'apprentissage relative à la modélisation).

Ces « feuilles modèles » que nous appellerons « modèles » présentent les éléments théoriques auxquels l'élève devra se référer pour modéliser les situations présentées. Le « modèle » contient les définitions des concepts utilisés, les relations entre grandeurs, les outils de modélisation (Gaidioz et al., 2004).

La séquence d'enseignement est une « application » du programme officiel en un objet directement utilisable en classe. Qu'il s'agisse d'un manuel ou d'une séquence proposée par un groupe de recherche-développement, le passage de la description de ce qui doit être enseigné (deux pages du Bulletin Officiel) à un document à distribuer aux élèves (plusieurs chapitres) nécessite des choix, des compléments par les auteurs.

Afin d'enseigner la relativité du mouvement, les auteurs ont fait le choix d'introduire en premier le concept de mouvement au sens où les physiciens l'entendent et d'en présenter les principales caractéristiques. Pour la compréhension du principe d'inertie, ils ont décidé d'introduire aux élèves le concept de force, déjà au programme de Troisième mais rarement maîtrisé en début de Seconde.

L'analyse des modèles (feuilles modèles) distribués aux élèves pendant cet enseignement est une aide précieuse à l'analyse des concepts introduits et du passage du programme à la séquence. Nous avons numéroté ces modèles 1, 2 et 3 car cela correspond à l'ordre de présentation de ceux-ci dans la séquence. Cette numérotation ne permet pas de mettre en avant le fait que les modèles 1 et 2 sont indépendants et que le modèle 3 permet de faire le lien entre les concepts présentés dans les modèles 1 et 2.

Modèle 1 : Modèle du mouvement d'un objet

1. Représentation d'un objet par un point.

En général, pour étudier le mouvement d'un objet, on étudie le mouvement de l'un de ses points. Souvent, on choisit de représenter l'objet par ce point pour que l'étude du mouvement de l'objet se ramène à l'étude du mouvement du point.

En physique, il est souvent intéressant d'étudier le mouvement du centre de gravité. Dans ce cas, on représente l'objet par ce point auquel on peut attribuer la masse de l'objet.

Le premier item de ce modèle est la **représentation d'un objet par un point**. En effet, en mécanique du point, dès qu'on parle de mouvement d'un objet, on s'intéresse en fait au mouvement de l'un de ses points. Ce premier item présente l'avantage de faire entrer l'élève directement dans un processus de modélisation de la réalité. A partir d'un mouvement observable, le physicien choisit de sélectionner certaines informations et d'en négliger d'autres.

2. Trajectoire du point représentant un objet.

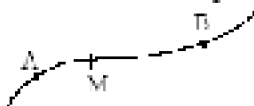
La trajectoire est l'ensemble des positions occupées par le point au cours de son mouvement. On dit que cette trajectoire est la trajectoire de l'objet. On indique généralement par une flèche sur la trajectoire le sens du mouvement.

Le deuxième item concerne la **trajectoire de ce point**. La trajectoire étant une courbe, c'est-à-dire un ensemble de points, on comprend la nécessité d'avoir introduit préalablement la représentation par un point. On retrouve la notion de position présentée en mécanique classique. Les auteurs introduisent aussi la notion de sens du mouvement, qui sera distingué plus loin de la direction du mouvement.

3. Vitesse du point représentant un objet.

La vitesse moyenne du point représentant entre A et B est égale à la longueur du trajet AB divisée par la durée t nécessaire pour parcourir AB.

$$v = \frac{\text{des la distance parcourue sur le trajet entre A et B}}{\text{durée nécessaire à ce parcours}} = \frac{AB}{t}$$



Lorsque les positions A et B du point sont très proches, cette vitesse est la vitesse du point en M.

Unités :

AB en mètre (m)

t en seconde (s)

Le troisième item concerne la vitesse de ce point. La vitesse est introduite par le biais de la vitesse moyenne. Ramenée à la vitesse mise pour parcourir une très petite distance

(approximation de la vitesse instantanée), ce sera un outil pour repérer les variations du module de la vitesse dans le temps.

4. Caractérisation du mouvement du point représentant un objet.

Le mouvement du point est caractérisé par :

- sa direction
 - la direction du mouvement du point ne change pas sur les parties rectilignes de sa trajectoire.
 - la direction du mouvement du point change :
 - aux endroits où la trajectoire cesse d'être rectiligne ;
 - en tout point des parties courbes de la trajectoire
- son sens (à une direction correspond deux sens)
- la vitesse du point

Principaux types de mouvements :

- Le mouvement d'un point est rectiligne quand sa trajectoire est une ligne droite.
 - Le mouvement d'un point est circulaire quand sa trajectoire est un cercle ou une portion de cercle.
- Lorsque la valeur de la vitesse du point ne varie pas on dit que le mouvement est uniforme.

Le quatrième item concerne la caractérisation du mouvement du point représentant un objet. Le modèle présente la liste des caractéristiques qui permettent en physique de décrire un mouvement. La direction n'est pas définie explicitement mais on donne aux élèves un critère pour savoir si la direction change : la direction ne change pas seulement si la trajectoire est une ligne droite et donc si le mouvement est rectiligne. Il est aussi précisé que pour un mouvement uniforme la vitesse ne varie pas. Le modèle permet donc de savoir que pour un mouvement rectiligne uniforme, ni la direction ni la vitesse varient.

Il est intéressant de noter que l'indépendance entre la variation de direction et la variation de vitesse telle qu'elle est présentée ici est une conséquence directe du fait qu'on n'utilise pas la vitesse au sens vectoriel. En effet, le vecteur vitesse contient à la fois les informations de vitesse et de direction. La vitesse devient alors le module du vecteur vitesse. Il s'agit d'une grandeur mesurable qui va varier de façon continue dans le temps. La direction devient l'axe sur lequel se déplace l'objet. Il ne s'agit pas d'une grandeur mesurable. Son changement peut se faire de manière « discontinue » (même si le terme n'est pas adapté puisqu'il ne s'agit pas d'une grandeur mesurable) : par exemple un virage à 90° (représentation de l'objet par le point implique changement brusque).

5. Référentiel.

Un référentiel est un objet par rapport auquel on repère les positions successives du point dont on étudie le mouvement

Choix du référentiel : on choisit le référentiel le plus adapté au mouvement que l'on souhaite décrire

Lorsque l'on décrit le mouvement d'un objet (ou du point qui le représente), il faut indiquer le référentiel choisi

Le cinquième et dernier item concerne le référentiel. Ce point est essentiel dans le programme. Les auteurs ont décidé de le présenter en dernier dans le modèle du mouvement afin de définir préalablement ce qu'était le mouvement.

On peut donc organiser les éléments présents dans ce modèle en représentant les relations entre les différentes composantes du concept de mouvement :

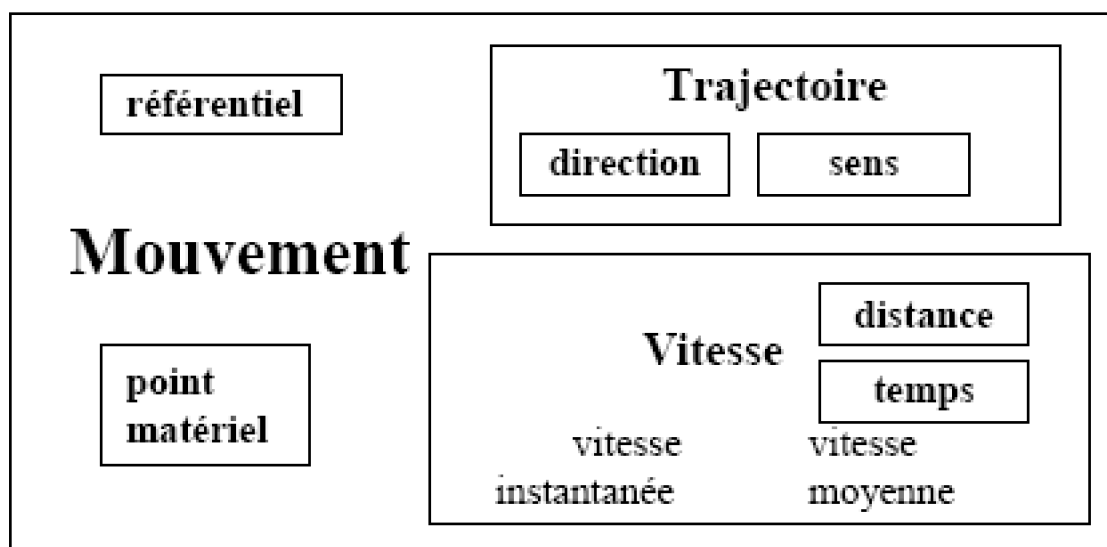


Figure 6□9. Analyse du concept du mouvement selon les différentes composantes introduites dans l'enseignement.

Le concept de mouvement n'a de sens que si on regarde le mouvement d'un objet par rapport à un autre. En ce sens, la composante "référentiel" est essentielle. De plus, en physique, le mouvement d'un objet nécessite le choix d'un point pour représenter cet objet auquel on attribue la masse de l'objet dans la modélisation (notion de point matériel). La caractérisation du mouvement tient compte des informations (indépendantes) contenues dans la trajectoire et la vitesse.

Cette analyse nous permet de voir quelles sont les composantes du concept de mouvement et donc les éléments qui sont liés à la compréhension de ce concept fondamental par les élèves.

4.3.2. Modèle 2 : « Interactions et forces »

Cette partie reprend la progression proposée par J.C. Guillaud (1998).

Afin d'introduire le concept de force – difficile à comprendre par les élèves (cf. cadre théorique sur les conceptions) – les auteurs ont choisi d'utiliser la notion d'action pour aider l'élève à donner un sens à la force.

« En mécanique, lorsqu'on introduit la force, il est crucial de lui donner le statut d'un concept de la physique permettant de décrire précisément l'action d'un objet sur un autre. Le terme d'action est plutôt adapté pour décrire la situation matérielle, la force est son correspondant en termes de modèle. » (Gaidioz et al., 2004, p.1037)

Voici la première partie du modèle distribué aux élèves introduisant l'outil DSI "Diagramme Système Interactions" (Dumas-Carré, 1987) :

Modèle des interactions (1^{ère} partie)

On appelle système un objet (matériel), une partie d'objet ou un ensemble d'objets (ce découpage de la réalité en systèmes est un choix fait par celui qui étudie la situation).

Interactions : quand un système A agit sur un système B, simultanément B agit sur A, on dit que A et B sont en interaction. L'action de A sur B est notée A/B et l'action de B sur A est notée B/A.

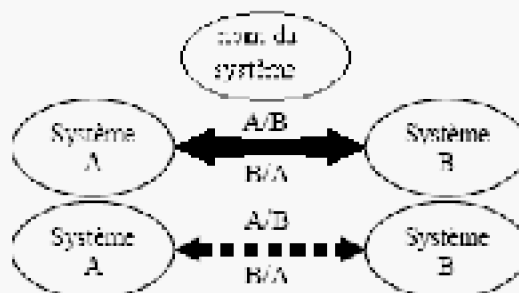
Cet énoncé est applicable dans toutes les situations, c'est à dire quand les systèmes sont au repos et aussi quand ils sont en mouvement

Représentation

Représentation d'un système

Représentation d'une interaction de contact

Représentation d'une interaction "à distance"



Une fois un système choisi, on ne s'intéresse qu'à ses interactions avec les autres systèmes (systèmes extérieurs).

On représente ces interactions avec les autres systèmes sur le même schéma. Ce schéma s'appelle le diagramme système-interaction. Pour bien distinguer le système choisi des autres systèmes, on souligne son nom dans le diagramme.

La notion de **système** est introduite pour délimiter le système étudié sur lequel on regarde les forces "extérieures" (exercées par des éléments extérieurs à ce système). Cette notion de système permet de différencier l'objet (monde des objets et des événements) du système (monde de la théorie et du modèle) qui correspond à un choix du physicien, puisqu'un objet peut appartenir à des systèmes différents.

Afin de repérer les interactions, on passe par les caractéristiques de la situation matérielle. On dit que deux systèmes A et B sont en **interaction de contact** systématiquement lorsque A et B sont en contact. Si A et B ne sont pas en contact, on parle d'**interaction à distance** uniquement dans les cas suivants :

- A ou B correspond au système Terre : la Terre est en interaction à distance avec tous les systèmes à proximité ;
- A et B sont deux systèmes en interaction magnétique (clou et aimant par exemple).

Afin d'introduire le concept de force, on donne aux élèves la deuxième partie du modèle :

Modèle des interactions (2^{ème} partie)

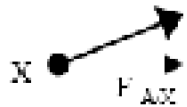
Quand un système X est en interaction avec un système A , on appelle *force exercée par A sur X* l'action de A sur X .

Pour représenter une force, on représente souvent le système sur lequel elle s'exerce par son centre de gravité auquel on attribue la masse du système.

On fait figurer ensuite la force exercée par A sur X par le représentant d'un vecteur accompagné du symbole ci-contre et dont les caractéristiques sont les suivantes :

- son origine est le point représentant le système ;
- sa direction et son sens sont ceux de la force ;
- sa longueur est proportionnelle à la valeur de la force.

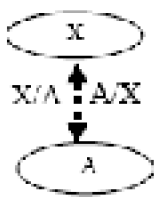
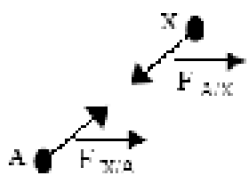
La valeur de la force s'exprime en newton (symbole : N).



Principe des actions réciproques

Quand deux systèmes A et X sont en interaction, la force exercée par A sur X et la force exercée par X sur A sont d'intensités égales et de sens opposés.

Une interaction est modélisée par deux forces qui sont, pour toutes les situations et dans tous les cas, d'intensités égales et de sens opposés. Les vecteurs qui les représentent sont sur la même droite ; cette droite dépend de la situation étudiée.

La force est définie dans ce modèle comme la modélisation de l'interaction. On remarque ici que l'interaction n'a donc pas une place fixe dans le monde du modèle. Une fois que les élèves ont bien intégré la notion d'interaction (présentée comme élément du modèle par le biais du diagramme système interaction), l'interaction peut devenir le fait que A agit sur B et B agit sur A , et se trouver alors dans le monde des objets et des événements.

Pour identifier les interactions, les élèves pourront suivre les règles suivantes :

- Si A agit sur B , les systèmes A et B sont en interaction (de contact ou à distance), et le système A exerce une force sur le système B de même que le système B exerce une force sur le système A .
- Si les systèmes A et B ne sont ni en interaction de contact ni en interaction à distance, alors on dira que le système A n'exerce pas de force sur le système B et que le système B n'exerce pas de force sur le système A .

On introduit une autre forme de représentation du concept de force (registre vectorielle). Cette représentation contient des informations importantes sur la force, notamment la direction et le sens qui sont liés aux caractéristiques de l'action. L'élève doit maîtriser l'outil vecteur dans ces représentations.

Dans le cas d'une interaction entre les systèmes A et B, on a en plus la relation :

$$\vec{F}_{A/B} = - \vec{F}_{B/A}$$

et donc :

$$\|\vec{F}_{A/B}\| = \|\vec{F}_{B/A}\|$$

Les auteurs ont décidé de rajouter la troisième loi de Newton dans leur enseignement afin d'insister sur l'aspect interaction. On retrouve ce choix dans la séquence proposée par Savinainen (2004). On note qu'à la formulation classique « Principe de l'action et de la réaction », les auteurs ont préféré la formulation « **Principe des actions réciproques** » qui reflète mieux la notion de simultanéité.

Nous remarquons ici un point non indiqué dans la séquence mais que nous souhaitons rajouter dans notre analyse. Lorsqu'on veut identifier et représenter les forces qui s'exercent sur un système, il est important de noter que ces forces s'exercent à un instant donné. Cependant, par abus de langage, lorsque toutes les forces identifiées sont exercées pendant un intervalle de temps pour lequel elles ont les mêmes caractéristiques, on pourra demander aux élèves d'identifier ou de représenter les forces pendant cet intervalle de temps. Par exemple, on pourrait demander de représenter les forces s'exerçant sur un mobile en chute libre. Il est important de noter que l'identification ou la représentation d'une force se fait à un instant donné, et que cet instant peut être représentatif d'un intervalle de temps.

On peut donc organiser les éléments présents dans ce modèle en représentant les relations entre les différentes composantes du concept de force :

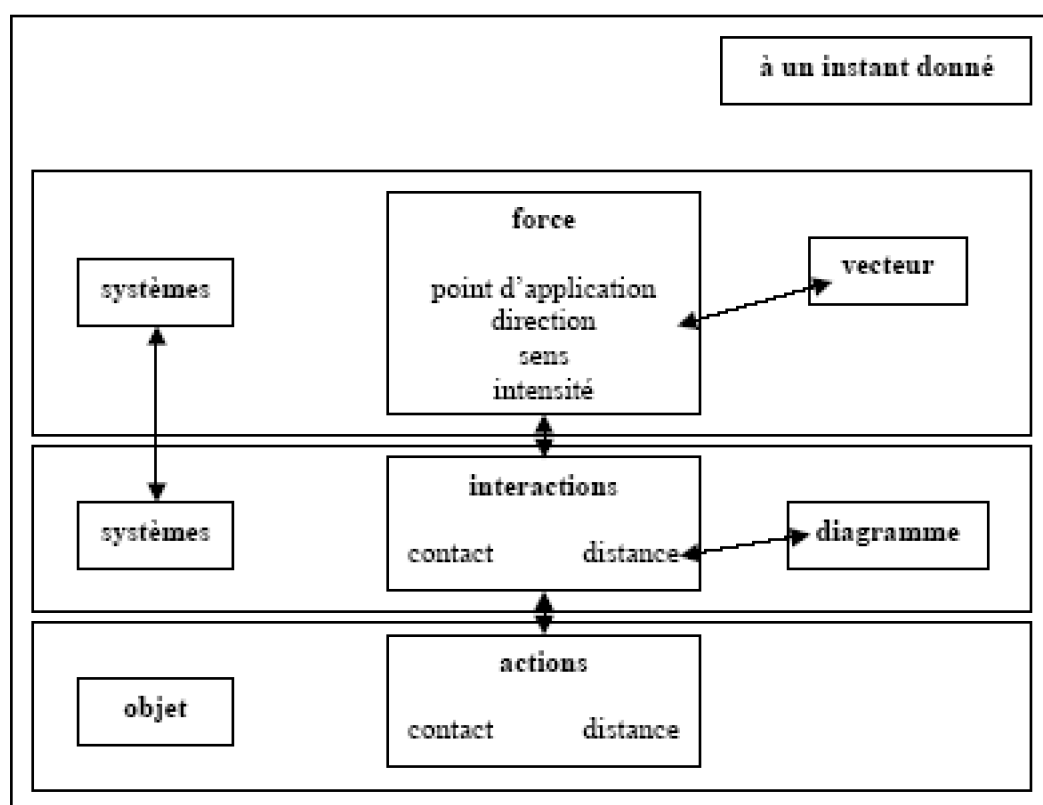


Figure 6 □ 10. Analyse du concept de force selon les différentes composantes introduites dans l'enseignement.

On voit bien sur le schéma l'aspect relationnel du concept de force. La force est mise en relation avec l'action, par l'intermédiaire des interactions. La représentation vectorielle de la force permet de mettre en évidence certaines de ses caractéristiques (direction, sens et intensité). Ce sont principalement les caractéristiques direction et sens, reliées aux caractéristiques de l'action, qui nous intéressent.

4.3.3. Modèle des « Lois de la mécanique »

Le physicien Pérès (1953) présentait ainsi le lien entre forces et mouvement :

«l'expérience la plus courante nous amène d'autre part à concevoir le lien entre les mouvements et les efforts, ou force, qui agissent sur les corps mobiles. Le but de la Mécanique est de préciser cette conception vague, d'établir, pour représenter les forces en jeu dans un système matériel, des schémas convenables, et d'obtenir enfin des relations mathématiques permettant de traiter les deux problèmes complémentaires suivants : a) Connaissant le mouvement d'un système matériel, analyser les forces qui sont en jeu ; b) Connaissant les forces prévoir le mouvement du système. C'est le second problème, plus difficile et plus important, qui nous occupera essentiellement dans la suite. » (p.1)

Le modèle proposé aux élèves propose en premier **les lois de la mécanique**. Ces lois permettent de faire le lien entre le modèle du mouvement et le modèle « Interactions et forces ». Elles sont composées de quatre lois adaptées du principe d'inertie.

A.

1. Si un système est immobile ou s'il est en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse et sa direction ne varient pas), alors les forces qui s'exercent sur le système se compensent.

2. Inversement :

Si les forces qui s'exercent sur un système se compensent, alors le système est immobile ou est en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire que sa vitesse et sa direction ne varient pas).

Cet énoncé est appelé principe d'inertie.

B.

1. Si un système n'est ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse et/ou sa direction varient), alors les forces qui s'exercent sur le système ne se compensent pas.

2. Inversement, si les forces qui s'exercent sur un système ne se compensent pas, alors le système n'est ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire que sa vitesse et/ou sa direction varient).

La loi A2 est celle qui se rapproche la plus de celle présentée dans le programme. On voit cependant que certains aspects de formulation diffèrent. Les auteurs ont préféré reprendre les termes employés dans le modèle du mouvement (immobile et rectiligne uniforme) et les reformuler en termes de direction et vitesse.

Trois lois ont été ajoutées (A1, B1 et B2). L'ensemble des quatre lois permet de passer de la description du mouvement (immobile ou rectiligne uniforme / autre) aux forces (se compensent / ne se compensent pas) mais aussi des forces à la description du mouvement. Cela reprend la difficulté soulevée par Pérès (cf. page précédente).

Conformément à la remarque faite dans le modèle du mouvement, vitesse et direction ne sont pas de même nature. Pour faciliter la compréhension des élèves, peut-être serait-il préférable de distinguer les verbes qui caractérisent la variation de la vitesse et de la direction. On pourrait par exemple avoir pour A1 :

Si un système est immobile ou s'il est en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse **ne varie pas** et sa direction **ne change pas**), alors les forces qui s'exercent sur le système se compensent.

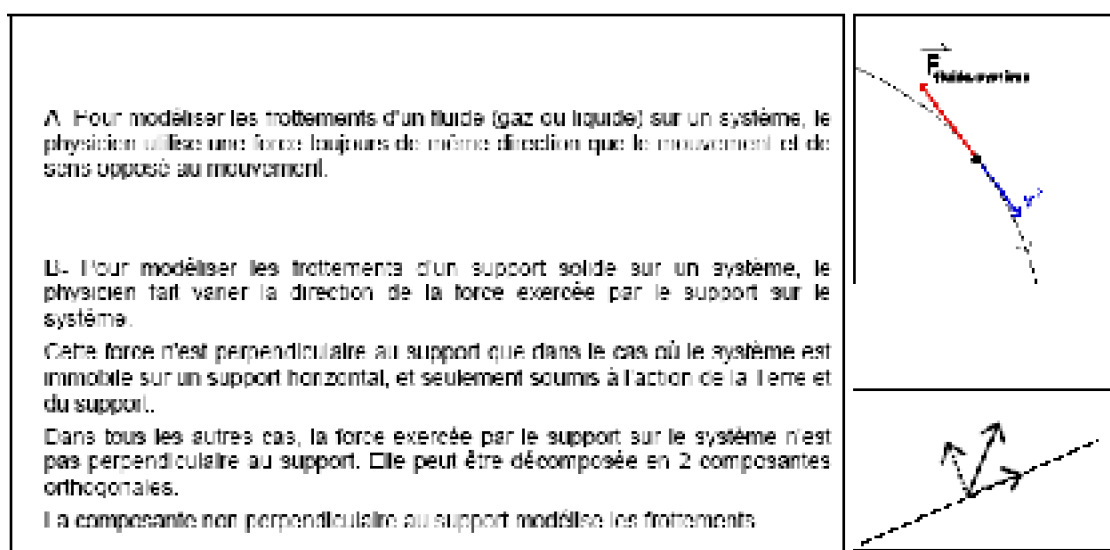
Le modèle présente ensuite un bref point sur **l'influence de la masse** :

Une même action exercée sur deux objets de masses différentes n'a pas le même effet sur le mouvement des objets : l'effet est plus important pour l'objet le plus léger.

Nous n'avons posé aucune question sur ce point. En effet, l'accent dans cette séquence n'est pas mis sur l'influence de la masse mais plutôt sur l'utilisation des lois qui permettent de passer du mouvement aux forces.

Les auteurs ont souhaité rajouter une partie nommée **modèle des frottements**. Ce modèle permet aux élèves d'avoir un outil pour comprendre comment les forces peuvent se compenser dans le cas d'un mobile tiré ou poussé en mouvement rectiligne uniforme sur un support. Il permet aussi aux élèves de comprendre comment orienter la force exercée par un fluide sur un objet en mouvement dans ce fluide.

Ce modèle trouve donc sa place à la suite des lois de la mécanique puisqu'il est justifié par le mouvement mais correspond aussi à un outil qui permet d'identifier les forces et se rapproche en ce sens du modèle « Interactions et forces ».



Nous considérerons les notions abordées dans ce chapitre comme des outils théoriques pour passer du mouvement (chapitre 1) aux forces (chapitre 2).



Figure 6-11. Analyse des lois de la mécanique.

Ce schéma met en évidence les notions abordées dans les parties 1 et 2 qui sont reprises dans la partie 3. Les lois de la mécanique permettent de relier les changements de direction et les variations du module de la vitesse du mouvement à la compensation (ou la non-compensation) de l'ensemble des forces qui s'exercent sur un système.

5. Utilisation des travaux de recherche

5.1. Découpage du savoir

Pour chacun des concepts introduits dans l'enseignement de mécanique, nous avons effectué une analyse des différentes composantes (voir paragraphe 4.3). Cela nous permet de varier la composante évaluée lors de l'élaboration des exercices afin de mieux localiser les difficultés des élèves. Cela s'appuie sur des hypothèses d'apprentissage puisque c'est en différenciant et en reliant les composantes d'un concept qu'on peut mieux le comprendre.

5.2. Hypothèses d'apprentissage

Nous considérons ici le terme « hypothèse » au sens mathématique du terme, c'est-à-dire comme un postulat de départ, correspondant à un choix théorique qui nous sert de base

pour construire notre outil. Nous reprenons ainsi certaines hypothèses d'apprentissage qui ont été utilisées au moment de la réalisation de la séquence comme axes de construction (Buty et al., 2004 ; Gaidioz et al., 2003).

5.2.1. En relation avec la modélisation

« Prenons l'exemple d'un objet posé sur une table et pensons à la distance qui sépare cette situation familière, qui relève de l'évidence, de la façon dont on la modélise en classes de seconde et de première. L'objet est modélisé par un point et les actions de la Terre et de la table, supposées de même intensité sont représentées par des vecteurs. Si on ne prend pas le temps d'explicitier les raisons pour lesquelles la physique procède ainsi, si on n'aide pas l'élève à prendre conscience de ce qu'on perd et de ce qu'on gagne à reconstruire la situation et à la modéliser de cette façon, on a toutes les chances de le déconcerter. Il peut d'autant plus être dérouté que le professeur présente comme allant de soi cette façon de rendre compte de la situation. » (Gaidioz et Tiberghien, 2003, p.73)

A partir d'une telle analyse de l'enseignement et de la physique, on comprend pourquoi une attention particulière est portée aux phénomènes de modélisation. Nous reprenons l'hypothèse que la compréhension des concepts de la physique, et en particulier ceux de mécanique, nécessite la construction de liens entre les éléments qui relèvent du monde matériel, des objets et des événements, et des éléments de modélisation utilisés par les physiciens (Buty et al., 2004).

Nous avons choisi de ne pas poser des questions explicites sur les processus de modélisation aux élèves car nous pensons que ce genre de questions seraient trop loin des formes traditionnelles d'évaluation et qu'il est important pour nous de produire des outils fonctionnels pour l'enseignant. Cependant, le travail de Toix (2004) nous permet de voir le sens que peut avoir le modèle chez des élèves de seconde ayant suivi la séquence de mécanique Outils.

Nous prenons l'hypothèse de modélisation comme un outil dans la construction de nos tests afin de varier la nature des questions. Nous vérifions que nos questions demandent aux élèves de passer du monde matériel au modèle et inversement. Nous nous assurons aussi que les liens entre éléments d'un même monde sont correctement effectués.

Du point de vue de la formulation des questions, il est important de bien vérifier qu'il n'y a pas "confusion" entre les deux mondes à l'intérieur d'une même proposition (par exemple la question « Quelle force fait tomber la feuille ? » mélange d'une part la force, élément du modèle, et d'autre part un événement perceptible « la feuille qui tombe »).

5.2.2. En relation avec les registres sémiotiques

Une autre hypothèse utilisée dans la construction de la séquence est inspirée des travaux sur les représentations (voir cadre théorique, chapitre 2). Cette hypothèse est que la compréhension d'un concept suppose la capacité de représenter ce concept selon différents registres sémiotiques (langue naturelle, schéma, etc.) et de passer de l'un à

l'autre de ces registres. La mise en relation, pour un même objet de savoir, de représentations différentes (langage naturel, graphe, schéma, etc.) est une source de difficultés des élèves, et en même temps une condition nécessaire à la compréhension conceptuelle.

Nous utilisons cette hypothèse lors de la réalisation des tests en variant les registres mis en jeu dans les exercices et en demandant aux élèves de passer d'un registre à l'autre pour un même concept.

5.2.3. Connaissances préalables des élèves/conceptions

L'enseignement a été conçu en prenant en compte les connaissances préalables des élèves ainsi que les conceptions mises en évidence dans les nombreux travaux de recherche. Ainsi le diagramme système interaction est un outil qui permet d'aider les élèves à ne pas mobiliser l'idée de force motrice. En passant par les interactions, l'élève peut voir que la force qu'il a envie de mettre ne correspond ni à une interaction de contact ni à une interaction à distance.

Les travaux sur les conceptions (cf. cadre théorique, p.40) nous permettent de prévoir les difficultés des élèves. Afin de vérifier l'apprentissage et l'efficacité de l'enseignement, il est intéressant de poser des questions mettant en jeu des situations où les conceptions des élèves les poussent à écrire une réponse non conforme à l'enseignement. Les tests développés dans le cas de la recherche sont alors très utiles puisqu'ils présentent de telles situations déjà proposées sous forme de questionnaire.

5.3. Cohérence

En partant du constat que seule la performance de l'élève dans une situation donnée (situation matérielle proposée dans l'exercice) est évaluée et que nous souhaitons inférer sur les connaissances de l'élève, nous avons fait le choix de poser plusieurs fois le même type de questions, faisant a priori appel à de mêmes connaissances, afin de vérifier le taux de réussite des élèves sur l'ensemble de ces questions.

Ainsi si l'élève manifeste dans toutes les situations des performances conformes à la physique enseignée, on pourra faire l'hypothèse qu'il a les connaissances correspondantes d'une manière générale. De même si l'élève manifeste des performances qui sont toujours incorrectes au regard de la physique enseignée, on pourra inférer que l'élève n'a pas les connaissances. Dans le cas intermédiaire d'un mélange de type de performance relativement à la physique enseignée (conforme / pas conforme), on conclura que l'élève est en cours d'apprentissage et a un comportement instable dans la mise en œuvre de ces connaissances.

Cet aspect de l'évaluation de la cohérence a été analysée par Savinainen (2004). Nous rappelons que l'auteur a distingué trois types de cohérence correspondant à différentes variations dans les situations :

- la cohérence « représentationnelle » : l'élève peut utiliser correctement différentes représentations d'un même concept et passer d'une représentation à une autre ;

- la cohérence contextuelle : l'élève peut appliquer un concept ou une loi physique dans une variété de situations, familières ou nouvelles ;
- la cohérence inter-conceptuelle : l'élève est capable de faire le lien entre différents concepts.

La cohérence principale que nous abordons correspond à ce que Savinainen appelle la cohérence contextuelle. Cette cohérence est un moyen de voir le degré de maîtrise d'un concept.

La cohérence « représentationnelle » est abordée dans notre travail par l'analyse des questions en termes de registres sémiotiques. La cohérence inter-conceptuelle est en lien avec l'analyse de questions faisant intervenir des liens entre concepts (par exemple les questions mettant en jeu les lois de la mécanique font intervenir le lien entre le concept de mouvement et le concept de force).

Nous rajoutons une quatrième forme de cohérence : la cohérence temporelle : l'élève peut appliquer correctement un concept ou une loi physique à différents moments de l'enseignement. Cette cohérence temporelle est un outil pour construire des tests différents et pour suivre l'évolution des réponses des élèves à propos d'un même concept ou d'une même loi.

6. Synthèse de la méthodologie de construction

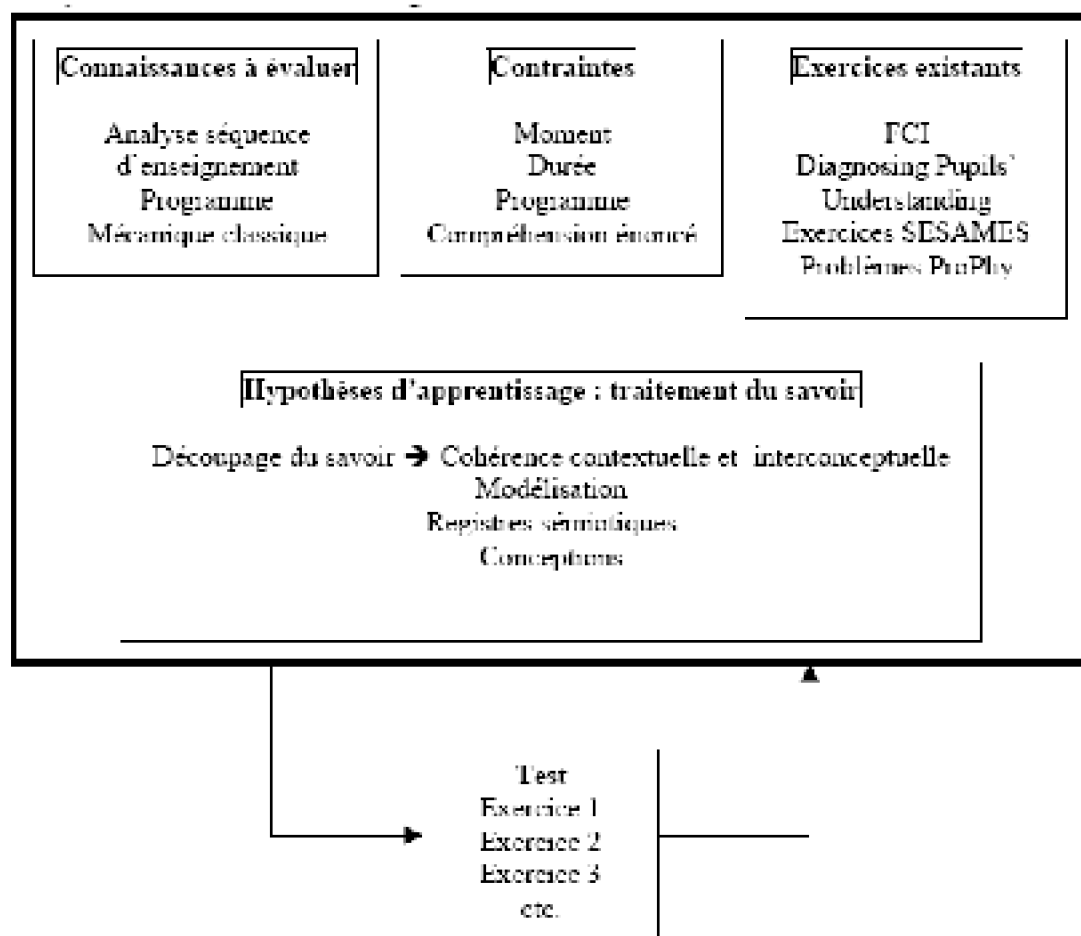


Figure 6□12. Synthèse de la méthodologie de production des tests et des exercices.

Afin de produire les tests et chacun des exercices qui les constituent, nous regardons donc les connaissances en jeu dans la séquence que nous voulons évaluer. En tenant compte des contraintes de temps, de respect de programme et de compréhensibilité, nous analysons les exercices existants afin de voir si certains peuvent convenir pour nos tests. Si c'est le cas, nous les modifions et les complétons si besoin. S'il nous manque des exercices pour évaluer certains points de savoir, nous en créons en utilisant éventuellement les situations matérielles proposées dans des exercices existants. Nous avons sans cesse en tête les hypothèses d'apprentissage que nous avons faites afin de créer, de modifier ou de compléter des questions. Il est important de noter qu'il ne s'agit pas d'un processus méthodologique linéaire mais que nous devons plutôt prendre en compte chacun de ces points pour produire nos tests. Les tests ainsi développés sont à nouveau analysés par cet ensemble de critères et nous arrivons après plusieurs passages au test tel que nous souhaitons le faire passer aux élèves.

Chapitre 7 : Présentation des tests

1. Le mouvement

Nous avons utilisé l'analyse des composantes du concept de mouvement introduites dans la séquence d'enseignement (voir Figure 6-9). Nous avons choisi des exercices afin d'évaluer les différentes (composantes vitesse, trajectoire, caractérisation du mouvement, point représentant l'objet et référentiel) et de pouvoir les relier entre elles. Nous avons utilisé la méthodologie présentée dans la Figure 6-12 (programme, contenu de l'enseignement, modélisation, registres sémiotiques, cohérence, acceptabilité/fonctionnalité) afin d'élaborer le test. Nous présentons ici l'analyse du contenu à évaluer en termes de modélisation et de registres sémiotiques, puis nous présentons le test développé et nous illustrons le développement de l'un des exercices.

1.1. Analyse du concept de mouvement en termes de modélisation et de registres sémiotiques

Pour faire cette analyse, nous utilisons un tableau à double entrée :

- en lignes figurent les différents registres sémiotiques (ceux présents dans la séquence) ;
- en colonnes figurent les deux mondes introduits par Tiberghien (1994) : le monde des objets et des événements (O/E) et le monde de la théorie et du modèle (T/M).

Nous remplissons le tableau avec les différents éléments susceptibles d'être donnés aux élèves dans l'énoncé ou demandés dans leur réponse.

Les flèches représentent les passages qu'on peut potentiellement demander aux élèves. On voit ainsi qu'on peut leur demander de passer d'une description de la situation en langue naturelle à la représentation de la trajectoire ou dans l'autre sens de demander aux élèves une situation matérielle qui pourrait correspondre à une trajectoire donnée. On peut aussi demander aux élèves d'effectuer des liens internes à une case : passer de la chronophotographie à la trajectoire ou faire le lien entre trajectoire, vitesse et mouvement. Il est utile pour chaque exercice d'analyser les questions à l'aide de ce tableau.

1.2. Test développé

Voici le test que nous avons développé. Nous illustrons par la suite la méthodologie de développement pour l'exercice 3.

Exercice 1

Exercice 2

Le diagramme ci-dessous montre les positions, à des intervalles de temps de 0,2 secondes, de deux caisses A et B qui se déplacent sur des tapis roulants. Les photographies sont prises par-dessus. Les deux caisses se déplacent vers la droite.



(a) Représenter la trajectoire de chacune des deux caisses dans le référentiel terrestre.

Caisse A	Caisse B

(b) Comment varie la vitesse de chacune des deux caisses dans le référentiel terrestre ?

Cochez le case lorsque vous pensez que la proposition est correcte.

	caisse A	caisse B
Sa vitesse est constante.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sa vitesse augmente.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sa vitesse diminue.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

(c) Comment décrivez vous le mouvement de chacune des deux caisses dans le référentiel terrestre ?

Cochez le case lorsque vous pensez que la proposition est correcte.

	caisse A	caisse B
Elle a un mouvement rectiligne uniforme.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elle a un mouvement rectiligne non uniforme.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

(d) Pensez que les deux caisses ont la même vitesse dans le référentiel terrestre à un moment donné ?

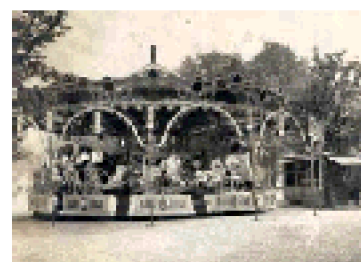
- ☐ non
- ☐ oui, au moment 2
- ☐ oui, au moment 5
- ☐ oui, à un moment de l'intervalle 3 à 4

(e) Justifiez votre réponse à la question (d)

Exercice 3

Un enfant se rend à une fête foraine avec sa mère et veut faire un tour de manège. Sa mère l'installe dans une voiture du manège et va s'asseoir sur un banc à côté du manège. Le manège se met en route puis atteint au bout d'un tour une vitesse constante et la mère voit alors son enfant passer devant elle à des intervalles de temps réguliers.

On s'intéresse au mouvement de l'enfant.



Choix un point de l'enfant qui permet d'étudier son mouvement global :

Remplir le tableau ci-dessous colonne par colonne.

Situation étudiée	Le premier tour où le manège se met en route.	Le premier tour où le manège se met en route.	Après un tour de manège.	Après un tour de manège.	Après un tour de manège.
Référentiel	Voiture du manège.	Le centre du manège.	Le centre du manège.	Un autre enfant sur le manège.	Sa mère
La trajectoire du point représentant l'enfant est	<input type="checkbox"/> un point <input type="checkbox"/> une ligne droite <input type="checkbox"/> un cercle <input type="checkbox"/> autre :	<input type="checkbox"/> un point <input type="checkbox"/> une ligne droite <input type="checkbox"/> un cercle <input type="checkbox"/> autre :	<input type="checkbox"/> un point <input type="checkbox"/> une ligne droite <input type="checkbox"/> un cercle <input type="checkbox"/> autre :	<input type="checkbox"/> un point <input type="checkbox"/> une ligne droite <input type="checkbox"/> un cercle <input type="checkbox"/> autre :	<input type="checkbox"/> un point <input type="checkbox"/> une ligne droite <input type="checkbox"/> un cercle <input type="checkbox"/> autre :
La vitesse du point représentant l'enfant ...	<input type="checkbox"/> est nulle <input type="checkbox"/> est constante non nulle <input type="checkbox"/> augmente <input type="checkbox"/> diminue	<input type="checkbox"/> est nulle <input type="checkbox"/> est constante non nulle <input type="checkbox"/> augmente <input type="checkbox"/> diminue	<input type="checkbox"/> est nulle <input type="checkbox"/> est constante non nulle <input type="checkbox"/> augmente <input type="checkbox"/> diminue	<input type="checkbox"/> est nulle <input type="checkbox"/> est constante non nulle <input type="checkbox"/> augmente <input type="checkbox"/> diminue	<input type="checkbox"/> est nulle <input type="checkbox"/> est constante non nulle <input type="checkbox"/> augmente <input type="checkbox"/> diminue
Le mouvement du point représentant l'enfant est :	<input type="checkbox"/> rectiligne uniforme <input type="checkbox"/> rectiligne non uniforme <input type="checkbox"/> circulaire uniforme <input type="checkbox"/> circulaire non uniforme <input type="checkbox"/> immobile <input type="checkbox"/> autre :	<input type="checkbox"/> rectiligne uniforme <input type="checkbox"/> rectiligne non uniforme <input type="checkbox"/> circulaire uniforme <input type="checkbox"/> circulaire non uniforme <input type="checkbox"/> immobile <input type="checkbox"/> autre :	<input type="checkbox"/> rectiligne uniforme <input type="checkbox"/> rectiligne non uniforme <input type="checkbox"/> circulaire uniforme <input type="checkbox"/> circulaire non uniforme <input type="checkbox"/> immobile <input type="checkbox"/> autre :	<input type="checkbox"/> rectiligne uniforme <input type="checkbox"/> rectiligne non uniforme <input type="checkbox"/> circulaire uniforme <input type="checkbox"/> circulaire non uniforme <input type="checkbox"/> immobile <input type="checkbox"/> autre :	<input type="checkbox"/> rectiligne uniforme <input type="checkbox"/> rectiligne non uniforme <input type="checkbox"/> circulaire uniforme <input type="checkbox"/> circulaire non uniforme <input type="checkbox"/> immobile <input type="checkbox"/> autre :

1.3. Exemple illustré du développement d'un exercice

Le test que nous avons développé se compose de trois exercices. Les deux premiers exercices sont issus d'exercices déjà existants (Millar, 2003) et transformés selon les différents critères exposés Figure 6-12 (p.104). Ces deux exercices permettent de tester les composantes suivantes : vitesse moyenne (comparaison de la vitesse de deux objets), vitesse instantanée (évolution de la vitesse dans le temps), caractéristiques du mouvement, trajectoire (représentation graphique de la trajectoire).

La contrainte de produire un test évaluant les compétences exigibles au programme et l'ensemble des composantes introduites dans l'enseignement nous ont poussé à trouver un troisième exercice. Cet exercice devait permettre d'évaluer la capacité de l'élève à :

- décrire un mouvement dans différents référentiels afin d'avoir un indicateur de leur

compréhension de la relativité du mouvement ;

- établir le lien entre mouvement, trajectoire et vitesse (interne au monde du modèle).

Nous avons donc opté pour un exercice sous forme de tableau avec des questions à choix multiples. Nous ne souhaitons pas savoir comment les élèves décriraient le mouvement avec leurs propres termes mais plutôt voir s'ils pouvaient associer des mouvements proposés à des situations et des référentiels. De plus, la contrainte de temps nous incitait à choisir des QCM afin de pouvoir poser aux élèves de nombreuses questions dans le temps imparti (30 minutes pour la totalité des trois exercices). Afin de vérifier une autre composante du mouvement non évaluée, nous avons aussi choisi de rajouter une question sur le choix d'un point représentant l'objet pour l'étude du mouvement.

Pour la situation, nous avons repris un exercice du groupe SESAMES proposant un enfant sur un manège (dans une fête foraine) et proposant de représenter les trajectoires dans le référentiel du manège et dans le référentiel d'un observateur extérieur (sa maman). L'étude préliminaire nous avait permis de tester cet exercice et de vérifier que la situation était compréhensible par les élèves.

1.4. Analyse a priori de l'exercice 3

Nous considérons ici l'analyse a priori de l'exercice comme l'analyse faite avant l'analyse des réponses des élèves et mettant en avant l'analyse du savoir en jeu dans l'exercice, en particulier en termes de modélisation, de registres sémiotiques, et de cohérences mais aussi de difficultés attendues des élèves.

L'exercice 3 propose une situation de la vie quotidienne, avec des objets animés (enfant, maman) et des objets inanimés (manège). L'énoncé présente les caractéristiques de la situation : un enfant est sur un manège, le manège se met en route puis atteint une vitesse constante, sa mère s'assoit sur un banc. Cette situation nous permet de distinguer deux phases différentes : la mise en route du manège (deux premières colonnes du tableau) et le moment où le manège tourne à vitesse constante (trois dernières colonnes). Cette situation peut faire intervenir un mouvement circulaire (mouvement de l'enfant dans le référentiel Terre). En prenant un référentiel lié au manège (la voiture dans laquelle se trouve l'enfant, un autre enfant sur le manège), on fait intervenir l'immobilité. Dans le cas d'un référentiel lié au référentiel Terre (la maman), on fait intervenir un mouvement circulaire. Le référentiel « centre du manège » peut être assimilé au référentiel Terre puisque le centre en tant que point est fixe par rapport au référentiel Terre. La réponse attendue est donc un mouvement circulaire (non uniforme pour la colonne 2, uniforme pour la colonne 3). On remarque cependant que si le centre est pris comme un élément matériel du manège lié donc au référentiel du manège, il y a là encore immobilité. Il s'agit d'une limite de l'exercice qui nécessiterait une modification.

Nous avons utilisé la difficulté des élèves remarquée dans notre étude préliminaire et connue des enseignants : la confusion entre référentiel et point de vue. Ainsi la maman ne voit pas un cercle mais dans le référentiel maman la trajectoire est un cercle. Nous avons choisi de proposer aux élèves les mouvements les plus souvent utilisés et présentés dans

leur modèle : rectiligne uniforme, rectiligne non uniforme, circulaire uniforme, circulaire non uniforme, immobile. Nous avons choisi de laisser une case « autre » pour leur permettre de proposer d'autres mouvements. On peut noter ici une inexactitude au niveau de la formulation puisqu'on ne peut pas dire que « le mouvement du point représentant l'enfant est immobile ». La formulation commune et correcte aurait été : « Le point représentant l'enfant ... : ... a un mouvement rectiligne uniforme, ...est immobile ». Cependant, cette formulation ne faisait plus apparaître nettement la structure du tableau : trajectoire/vitesse/mouvement. De plus, pour des contraintes de papier, nous avons choisi de laisser cette formulation critiquable.

Nous pouvons prévoir ici une difficulté de type contrat : certains élèves peuvent penser que si le mouvement rectiligne leur est proposé alors ils doivent cocher au moins une fois la case rectiligne. Notre hypothèse est que cette contrainte de contrat devrait avoir un rôle si l'élève a un doute sur sa réponse. Une erreur dans la réponse, provoquée par une interprétation du contrat, serait alors révélatrice d'un doute et donc indicateur d'une difficulté de compréhension.

Si on analyse le contenu de la séquence d'enseignement, on voit qu'il n'est jamais dit explicitement que la trajectoire et la vitesse dépendent du référentiel.

Le lien entre mouvement et référentiel est fait explicitement (« *Lorsqu'on décrit le mouvement d'un objet (ou du point qui le représente), il faut indiquer le référentiel choisi* »). Le lien entre mouvement, vitesse et trajectoire est aussi fait explicitement (« *Le mouvement du point est rectiligne quand sa trajectoire est une ligne droite. Le mouvement d'un point est circulaire quand sa trajectoire est un cercle ou une portion de cercle. Lorsque la valeur de la vitesse du point ne change pas on dit que le mouvement est uniforme.* »). Pour répondre à cet exercice, il faut donc utiliser ces deux informations et les relier entre elles pour en déduire que la trajectoire et la vitesse sont aussi dépendantes du référentiel.

Pour le choix du point, la question est évidemment première puisqu'on va parler de ce point dans toute la suite. Elle permet d'accéder à la compréhension par l'élève de l'influence du point choisi mais elle permet surtout à l'élève de rentrer dans le processus de modélisation du mouvement. En effet dans le cas d'un enfant dans une voiture, quasiment tout point de l'enfant peut être acceptable.

1.5. Analyse du test

1.5.1. Synthèse des situations et des questions

Tableau 7-2. Analyse des situations proposées et des questions posées aux élèves dans le test 1.

**Evaluer la compréhension des concepts de mécanique chez des élèves de seconde :
Développement d'outils pour les enseignants**

	Exercice 1	Exercice 2	Exercice 3
Situation proposée	course de voitures télécommandées (objets inanimés de petite taille) sur un rail de 3 mètres, départ au même moment, se déplacent l'une vers l'autre, se rencontrent à un mètre d'une extrémité.	deux caisses (objets inanimés de taille moyenne) sur deux tapis roulant, se déplacent dans le même sens, des photos sont prises régulièrement pour indiquer leurs positions respectives	un enfant (objet animé de taille moyenne) sur un manège (objet inanimé) en mouvement, sa mère (objet animé) le regarde
Questions	décrire le mouvement des voitures dire quelle est la voiture la plus rapide	représenter la trajectoire décrire le mouvement dire si les caisses ont la même vitesse à un moment	choisir un point représentant l'enfant décrire la trajectoire, la variation de vitesse et le mouvement de l'enfant dans différents référentiels
Connaissances, lois, principes testés	caractérisation du mouvement, vitesse moyenne	trajectoire, caractérisation du mouvement, vitesse instantanée	point représentant un objet, trajectoire, vitesse instantanée, caractérisation mouvement

1.5.2. Analyse du test en termes de savoir

Si on analyse l'ensemble des questions du test, voici ce qu'on obtient :

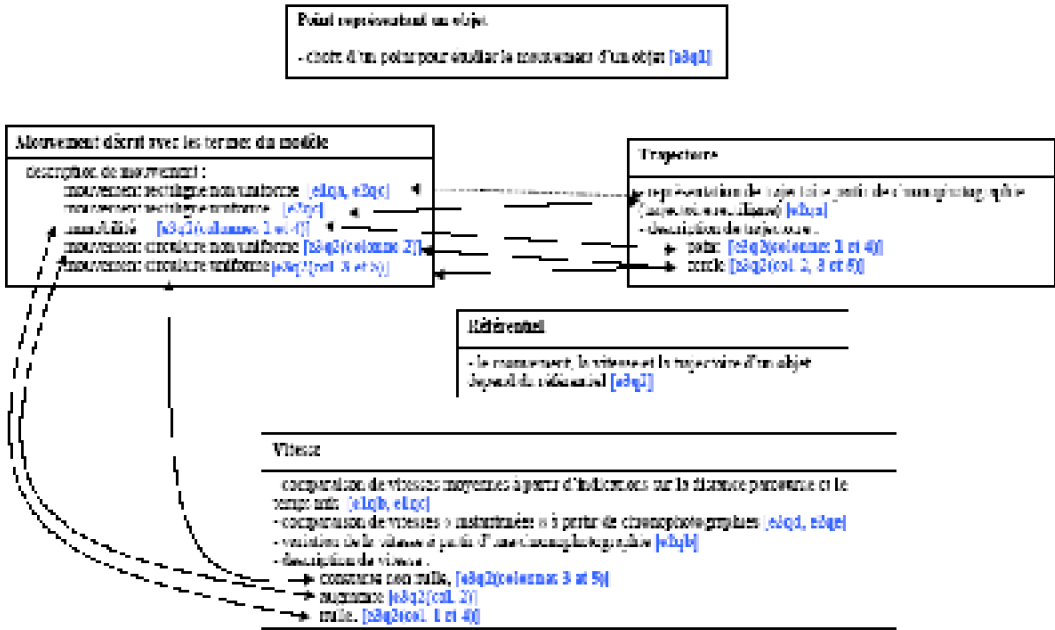


Figure 7-1. Analyse des questions du test sur le mouvement.

Cette analyse nous permet d'avoir un aperçu des composantes mises en jeu dans le test. A l'intérieur de chaque cadre, on a les questions qui se réfèrent à la même composante du concept de mouvement. Les flèches pleines nous permettent de voir les liens entre les questions qui évaluent différents concepts en lien les uns avec les autres et mis en jeu dans la même situation. Les flèches en pointillés indiquent les liens entre les questions qui évaluent différents concepts en lien les uns avec les autres mais mis en jeu dans des situations différentes.

On peut ainsi prévoir les cohérences testées a priori. En regardant les différentes questions évaluant les mêmes composantes mais proposant des situations matérielles différentes, on obtient des informations sur la cohérence contextuelle :

Tableau 7-3. Analyse a priori des cohérences contextuelles mises en jeu dans le test 1.

Composante du concept mis en jeu dans le test	Questions où l'élève a à manipuler cette composante
vitesse moyenne	1.b, 1.c, 2.e
vitesse instantanée	1.a, 2.b, 2.c, 3.2
trajectoire	2.a, 3.2
description mouvement	1.a, 2.c, 3.2
référentiel	3.2 (colonnes 1, 2, 3, 4 et 5)

En observant les questions évaluant des composantes différentes du concept de mouvement dans une même situation matérielle, on obtient des informations sur la cohérence inter-conceptuelle :

Tableau 7.4. Analyse a priori des cohérences inter-concepts mises en jeu dans le test 1.

Lien entre concepts mis en jeu dans le test	Questions mettant en jeu ces différents
---	---

	concepts
lien trajectoire, mouvement et variation de vitesse	2.a / 2.b / 2.c, 3.2

1.5.3. Analyse du test en termes de modélisation et de registres sémiotiques

On peut analyser les questions du test en termes de modélisation et de registres sémiotiques. Pour chaque exercice, on souligne les éléments présentés dans l'énoncé et on indique en gras les éléments demandés dans la réponse. Les flèches indiquent les passages à effectuer.

Exercice 1 :

	O/R	T/M
Langue naturelle	<u>Situation matérielle</u>	Point matériel Caractérisation Direction Vitesse Trajectoire
Schémas	<u>Dessin de la situation matérielle</u>	Point matériel Chronophotographie Trajectoire

Exercice 32

	OM	TM
Langue naturelle	<u>Situation matérielle</u>	Point matériel → Caractérisation Direction → Vitesse Trajectoire
Schéma	Dessin de la situation matérielle	Point matériel <u>Chronophotographie</u> Trajectoire

Exercice 33

	OM	TM
Langue naturelle	<u>Situation matérielle</u>	Point matériel → Caractérisation Direction → Vitesse Trajectoire
Schéma	Photo de la situation matérielle	Point matériel Chronophotographie Trajectoire

On voit donc que dans ce test, on a demandé principalement aux élèves de partir d'une situation du monde des objets et des événements (même si celle-ci est présentée selon les caractéristiques qui nous intéressent). On voit par contre que les différents éléments du modèle ont tous été mis en jeu.

On peut dire que ce test ne permet pas d'évaluer la capacité de l'élève de passer des éléments du modèle du mouvement à une situation matérielle.

2. Les forces

Nous suivons la même présentation que pour le test sur le mouvement.

2.1. Analyse du concept de force en termes de modélisation et de registres sémiotiques

FORCES					Principe des actions réciproques I/M
	O/E	Identification T/M		Compensation T/M	
Langue naturelle	Situation matérielle (en termes d'actions ?)	Interactions	Forces	Les forces (ne) se compensent (pas) Verticalement ... Horizontalement ...	Si F_{AB} alors F_{BA} Forces de même intensité
Schema	Dessin de la situation matérielle	DSI	Schéma des forces	Schema des forces	Schéma des forces
Forme vectorielle			Liste des vecteurs forces	$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{0}$	$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$

Tableau 7-5. Analyse du concept de force en termes de modélisation et de registres sémiotiques.

On voit que les éléments du modèle dans le cas de la force sont beaucoup plus complexes que dans le cas du mouvement. Ainsi les liens entre les éléments du modèle seront potentiellement plus nombreux. Par exemple, les éléments de modélisation des actions peuvent se faire sous forme de diagramme système interaction (cf. p.88), sous forme de liste des forces ou encore sous forme de schéma des forces. Le concept de force se prête bien à l'analyse de cohérences inter-conceptuelles.

2.2. Analyse en termes de difficultés des élèves

Comme de nombreux travaux l'ont montré, le concept de force est un concept très difficile à apprendre. Le modèle newtonien est souvent contre-intuitif. Il était donc ici particulièrement important de tenir compte des conceptions des élèves.

Nous avons souhaité évaluer principalement les conceptions suivantes :

- pour les élèves, il y a le plus souvent une force dans le sens du mouvement, notamment la force exercée à distance par l'agent qui a causé le mouvement initialement ;
- il est particulièrement difficile pour les élèves d'appliquer le principe des actions réciproques ; la plupart du temps, les élèves pensent que l'agent « le plus fort », « le plus lourd » ou l'agent « responsable du mouvement » est celui qui exerce la force la plus grande (conception évalué dans l'exercice du FCI présenté au paragraphe 3.1).

Pour le premier point, l'enseignement de la partie 3 devrait permettre aux élèves de faire fonctionner une autre règle que celle de la force motrice pour faire le lien entre force et mouvement. Pour le deuxième point, on se rend compte qu'il peut s'agir ici d'une confusion entre la comparaison de deux forces dites « réciproques » s'exerçant sur deux

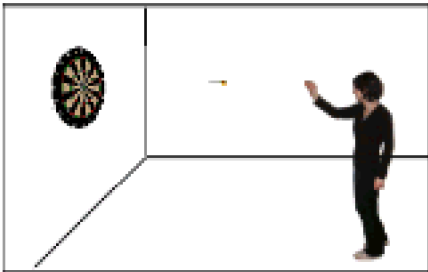
systèmes en interaction et la comparaison de deux forces exercées sur un même système. Il est donc intéressant de voir quelle peut-être l'influence de l'enseignement des lois de la mécanique sur l'utilisation d'une force motrice et sur l'application du principe des actions réciproques. Il faut donc que les enseignants donnent un test évaluant ces deux conceptions après avoir fini la partie 2 et avant de commencer la partie 3 de la séquence de mécanique.

2.3. Test développé

Les enseignants ont estimé que cette partie méritait un test d'une heure. Nous avons conçu un test comportant 5 exercices. Pour des contraintes de temps, les enseignants nous ont demandé de mettre les deux dernières questions de l'exercice 5 comme bonus.

Exercice 1

On s'intéresse à une fléchette lancée vers une cible, telle qu'elle est représentée sur le dessin ci-dessous.



Pour chaque couple de systèmes proposé, mettre une croix dans la colonne correspondante à l'interaction qu'il y a entre les deux systèmes.

	Interaction de contact	Interaction à distance	Pas d'interaction
fléchette / joueur			
fléchette / cible			
cible / terre			
fléchette / Terre			
joueur / sol			
joueur / terre			
fléchette / air			
fléchette / sol			

Exercice 2

Une personne lance une balle verticalement.

1. Faites le schéma des forces qui s'exercent sur la balle quand la personne lance la balle. Indiquez sur le schéma le sens du mouvement de la balle.

Evaluer la compréhension des concepts de mécanique chez des élèves de seconde : Développement d'outils pour les enseignants

2. Faites le schéma des forces qui s'exercent sur la balle quand la balle monte dans l'air. Indiquez sur le schéma le sens du mouvement de la balle.

Exercice 3

Un homme pousse une caisse en bois.



1^{ère} situation : la caisse ne bouge pas.

Parmi les propositions suivantes, cochez celle qui vous semble correcte :

- ☐ Il n'y a pas de force exercée par la caisse sur l'homme.
- ☐ La force exercée par la caisse sur l'homme est plus petite que la force exercée par l'homme sur la caisse.
- ☐ La force exercée par la caisse sur l'homme est plus grande que la force exercée par l'homme sur la caisse.
- ☐ La force exercée par la caisse sur l'homme a la même intensité que la force exercée par l'homme sur la caisse.

Justifiez votre réponse :

2^{ème} situation : la caisse commence à bouger.

Parmi les propositions suivantes, cochez celle qui vous semble correcte :

- ☐ Il n'y a pas de force exercée par la caisse sur l'homme.
- ☐ La force exercée par la caisse sur l'homme est plus petite que la force exercée par l'homme sur la caisse.
- ☐ La force exercée par la caisse sur l'homme est plus grande que la force exercée par l'homme sur la caisse.
- ☐ La force exercée par la caisse sur l'homme a la même intensité que la force exercée par l'homme sur la caisse.


Justifiez votre réponse :

Exercice 4


Au cours d'un match de football, une faute est faite dans la surface de réparation. Un joueur est donc amené à tirer au penalty. Il pose le ballon sur le sol au point de penalty puis l'appelle devant.

Pour chaque situation, remplir le tableau.

1.) Dans un premier temps nous nous intéressons au moment même où le joueur tape dans le ballon

	Système étudié	diagramme système interaction	Liste des forces qui s'exercent sur le système
	joueur		
	ballon		

2.) Dans un deuxième temps nous nous intéressons au parcours du ballon dans les dix pour cent dans la cage du gardien de but.

	m	Système étudié	diagramme système interaction	Liste des forces qui s'exercent sur le système
		joueur		
		ballon		

3.) Dans un troisième temps nous nous intéressons à l'arrêt du ballon par le gardien de but (très court)

Système étudié	diagramme système interaction	Liste des forces qui s'exercent sur le système
gardien		
ballon		



Exercice 5

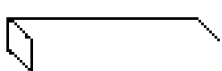
Chaque une des situations suivantes met en jeu deux systèmes. Pour chacune de ces situations, représenter la force exercée par le système 1 sur le système 2 et la force exercée par le système 2 sur le système 1.

Situation 1 : Thibaut, 80 kg, pousse Armand, 65 kg, et le fait reculer. Système 1 : Thibaut (à gauche sur le schéma). Système 2 : Armand (à droite sur le schéma).



1 2

Situation 2 : Un clou est attiré par un aimant. Il se déplace vers l'aimant, avec une vitesse qui augmente. Système 1 : l'aimant. Système 2 : le clou.



1 2

Bonus :

Situation 3 : Daniele pousse sa voiture de manière à ce que celle-ci avance à vitesse constante. Système 1 : Daniele. Système 2 : la voiture.



1 2

Bonus :

Situation 4 : Simon et Jael jouent. Ils se tiennent par les mains et chacun tente de tirer l'autre vers lui. Pour l'instant, ils ne bougent pas. Système 1 : Simon (à gauche). Système 2 : Jael (à droite).



1 2

2.4. Exemple illustré du développement d'un exercice

Comme nous l'avons fait pour le test sur le mouvement, nous allons détailler la construction d'un exercice précis en justifiant nos choix. Il s'agit de l'exercice 5. Nous ferons ensuite l'analyse a priori de cet exercice.

Cet exercice évalue la performance des élèves sur des questions mettant en jeu la 3ème loi de Newton. Nous avons déjà choisi un exercice (exercice 3) sur le principe des actions réciproques mais comportant des questions fermées (QCM) en langue naturelle sur la comparaison de l'intensité de deux forces (la force exercée par un homme sur une caisse et la force exercée par la caisse sur l'homme). Afin de varier les registres sémiotiques à mettre en œuvre, nous avons donc choisi de poser un exercice mettant en jeu une représentation schématique des vecteurs forces dans des cas d'interaction. Nous avons pour cela directement utilisé les exercices développés par Millar (2003).

A magnet and an iron nail are placed on a flat table. Iron is a magnetic substance and so it is attracted towards the magnet.



(a) Look at each of the following statements. For each statement, tick one box (✓) to show if you think it is true or false:

The magnet exerts a force on the nail

The nail exerts a force on the magnet

True	False

*If you have ticked 'TRUE' for both statements,
please answer part (b).*

(b) How do the sizes of the two forces compare?

Tick ONE box (✓)

- ☐ The force exerted by the magnet on the nail is bigger than the force exerted by the nail on the magnet.
- ☐ The force exerted by the magnet on the nail is the same size as the force exerted by the nail on the magnet.
- ☐ The force exerted by the magnet on the nail is smaller than the force exerted by the nail on the magnet.

Figure 7-2. Exemple d'un exercice du Diagnosing Pupils' Understanding (Millar, 2003).

Nous avons donc repris la situation en demandant aux élèves de représenter sur un même schéma la force exercée par le clou sur l'aimant et la force exercée par l'aimant sur le clou. Afin de bien distinguer ce qui relève des objets et des événements (dessin de la situation) de ce qui relève du modèle, nous avons préalablement représenté chaque système par un point pour que les élèves puissent représenter les forces demandées.

Pour mieux comprendre le critère de représentation des forces utilisé par les élèves, nous avons choisi de proposer d'autres situations que le clou et l'aimant et de poser la même question à chaque fois (cohérence contextuelle). Pour choisir ces situations, nous nous sommes inspirés là-aussi des exercices proposés par Robin Millar en essayant de varier la nature des systèmes (taille, animé/inanimé). Nous avons ainsi sélectionné quatre situations.

2.5. Analyse a priori de l'exercice

Cet exercice propose donc quatre situations de la vie quotidienne, avec des objets animés (Thibaut, Arnaud, Jad, Sliman, Danièle) et des objets inanimés (clou, voiture manège). Un premier énoncé présente la tâche à effectuer pour chacune des situations, puis chaque situation est présentée brièvement. Ces situations permettent de tester deux conceptions d'élèves sur la troisième loi de Newton (Licht et Thijs, 1990) :

1. « Si le système 1 met en mouvement le système 2 alors la force exercée par le système 1 sur le système 2 est plus grande que la force exercée par le système 2 sur le système 1 » (Thibaut et Arnaud, Clou et aimant, Danièle et voiture)
2. « Si le système 1 est plus « lourd » que le système 2 alors la force exercée par le système 1 sur le système 2 est plus grande que la force exercée par le système 2 sur le système 1 » (Thibaut et Arnaud, voiture et Danièle)

Nous avons choisi de nous limiter à ces deux conceptions et de ne pas proposer une situation de choc correspondant à la conception :

1. « Lors d'une collision entre un objet fixe et un objet en mouvement, si le système 1 est le système en mouvement alors la force exercée par le système 1 sur le système 2 est plus grande que la force exercée par le système 2 sur le système 1 »

Cet exercice permet aussi de voir quelles sont les caractéristiques des forces dans les schémas des forces. Nous avons ainsi distingué deux cas : des forces de répulsion (Thibaut et Arnaud, Danièle et voiture) et des forces d'attraction (clou et aimant, Jad et Sliman). Le défaut de s'en tenir à ces deux cas est que cela peut laisser les élèves penser que la force exercée par A sur B et la force exercée par B sur A ont toujours pour direction la droite (AB). C'est d'ailleurs déjà le cas dans le modèle où l'exemple est donné dans le cas d'une attraction (cf. modèle présenté p.88).

Pour répondre à cet exercice, il faut donc principalement utiliser le principe des actions réciproques mais aussi analyser la situation pour en déduire la direction et les sens des forces. Dans le cas de la non-application du principe, on peut aussi s'attendre à ce que les élèves n'indiquent qu'une seule force. Cependant, on demande dans l'énoncé de représenter les deux forces.

2.6. Analyse du test

2.6.1. Analyse des situations proposées

Tableau 7-6. Analyse des situations proposées et des questions posées aux élèves dans le test 2.

	Exercice 1	Exercice 2	Exercice 3	Exercice 4	Exercice 5
Situation proposée	une fléchette, dans les airs, lancée vers une cible	une balle lancée dans les airs vers le haut	un homme pousse une caisse	un footballeur tire dans un ballon en direction des buts, le gardien intercepte le ballon	4 situations : un homme en fait reculer un autre, un aimant attire un clou, une femme pousse une voiture, deux hommes immobiles se tirent l'un vers l'autre
Questions	identifier les interactions pour différents couples de systèmes	faire le schéma des forces lorsqu'on lance la balle et lorsque la balle monte dans les airs	comparer dans le cas où l'homme n'arrive pas à faire bouger la caisse et dans le cas où il la met en mouvement la force exercée par l'homme sur la caisse et la force exercée par la caisse sur l'homme	faire le DSI et la liste des forces au moment où le joueur tape dans le ballon, au moment où le ballon se déplace dans les airs, au moment où le gardien attrape le ballon	représenter la force exercée par le système 1 sur le système 2 et la force exercée par le système 2 sur le système 1 pour chacune des situations
Connaissances, lois, principes testés	interactions	forces	principe des actions réciproques	interactions, forces	principe des actions réciproques

2.6.2. Analyse du test en termes de savoir

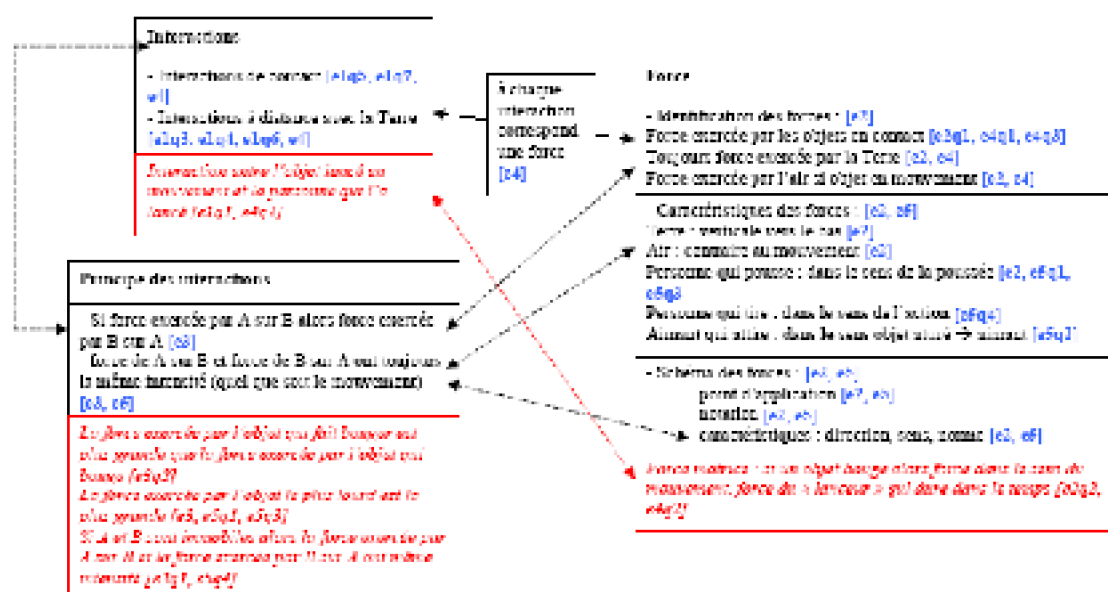


Figure 7-3. Analyse des questions du test 2.

Rappel : Cette analyse (Figure 7-3) nous permet d'avoir un aperçu des composantes mises en jeu dans le test. A l'intérieur de chaque cadre, on a les questions qui se réfèrent à la même composante du concept de mouvement. Les flèches pleines nous permettent de voir les liens entre les questions qui évaluent différents concepts en lien les uns avec les autres et mis en jeu dans la même situation. Les flèches en pointillés indiquent les liens entre les questions qui évaluent différents concepts en lien les uns avec les autres mais mis en jeu dans des situations différentes. On a rajouté en italique les parties correspondant aux conceptions erronées des élèves attendues a priori.

On peut ainsi prévoir les cohérences testées a priori. En regardant les différentes questions évaluant les mêmes composantes mais proposant des situations matérielles différentes, on obtient des informations sur la cohérence contextuelle (Tableau 7-7).

En observant les questions évaluant des composantes différentes du concept de force dans une même situation matérielle, on obtient des informations sur la cohérence inter-conceptuelle (Tableau 7-8).

Tableau 7-7. Analyse a priori des cohérences contextuelles mises en jeu dans le test 2.

Composante du concept mis en jeu dans le test	Questions où l'élève a à manipuler cette composante
identification des interactions	e1, e4
de contact (sauf l'air)	e1q5, e4sit1-2-3
avec la Terre	e1q3-4-6, e4sit1-2-3
avec l'air	e1q7, e4sit1-2-3
pas d'interaction dans le cas de non-contact (sauf Terre et aimant-clou)	e1q1-2-8, e4sit2-3
identification des forces	e2, e4
de contact (sauf l'air)	e2q1, e4sit1-2-3
avec la Terre	e2q1-2, e4sit1-2-3
avec l'air	e2q1-2, e4sit1-2-3
pas d'interaction dans le cas de non-contact (sauf Terre et aimant-clou)	e2q2, e4sit2-3
caractéristique des forces (sauf longueur)	e2, e5
force exercée par la Terre	e2q1-2
force exercée par l'air	e2q1-2
force de traction, de poussé	e2q1, e5q1-2-3-4
application du principe des interactions	e3, e5
existence de deux forces	e3, e5
égalité des forces	e3q1-2, e5q1-2-3-4

Tableau 7-8. Analyse a priori des cohérences inter-concepts mises en jeu dans le test 2.

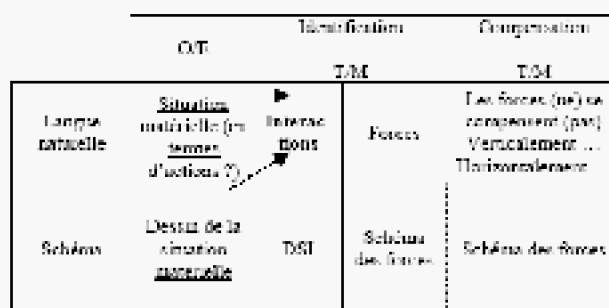
Lien entre concepts mis en jeu dans le test	Questions mettant en jeu ces différents concepts
lien interactions et forces	e4 colonnes1 et 2

2.6.3. Analyse du test en termes de modélisation et de registres sémiotiques

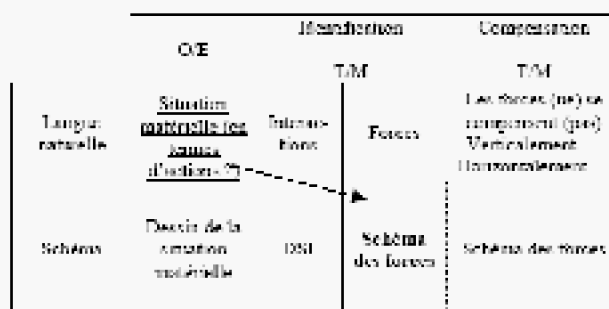
Exercice 1 :

**Evaluer la compréhension des concepts de mécanique chez des élèves de seconde :
Développement d'outils pour les enseignants**

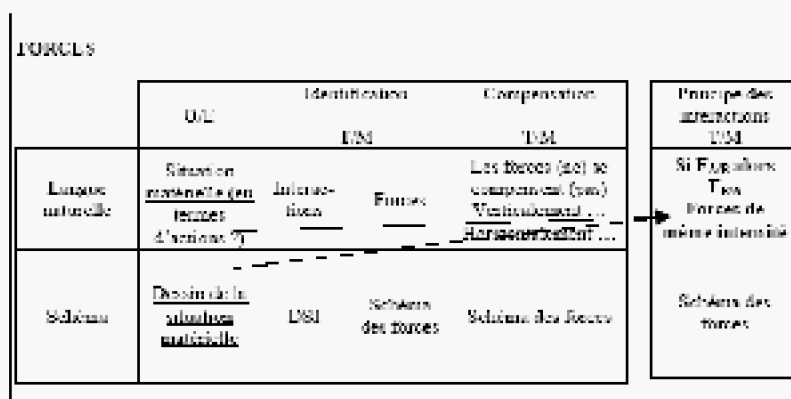
Exercice 1 :



Exercice 2 :



Exercice 3 :



Exercice 4 :

	O/E	Identification	Compensation
		T/M	T/M
Langue naturelle	<u>Situation matérielle (en termes d'actions ?)</u>	Interactions → Forces	Les forces (ne) se compensent (pas) Verticalement Horizontalement ...
Schéma	<u>Dessin de la situation matérielle</u>	DSI → Schéma des forces	Schéma des forces

Exercice 5 :

FORCES				
	O/E	Identification	Compensation	Principe des interactions T/M
		T/M	T/M	
Langue naturelle	<u>Situation matérielle (en termes d'actions ?)</u>	Interactions → Forces	Les forces (ne) se compensent (pas) Verticalement ... Horizontalement	Si F_{AB} alors F_{BA} Forces de même intensité
Schéma	<u>Dessin de la situation matérielle</u>	DSI → Schéma des forces	Schéma des forces	

Là encore, on voit qu'on a systématiquement demandé aux élèves de passer du monde des objets et des événements au monde de la théorie et du modèle, ce qui correspond au fonctionnement classique des exercices de physique. Ces analyses permettent de voir que la plupart des éléments du modèle ont été mis en jeu dans les différents exercices.

3. Les lois de la mécanique

3.1. Analyse des lois de la mécanique en termes de modélisation et de registres sémiotiques

MOUVEMENT			FORCES						
OME		T/M	LOIS	Langue naturelle	Situation motricelle (ou terrain d'action ?)	Identification TOC		Compensation T/M	Principe des interactions T/M
Langue naturelle	Situation motricelle	Caractéris-tique Direction Vitesse Trajectoire				Interven-tion	Forces		
Schéma	Desin de la situation motricelle	Chacopictographe Trajectoire				DRT	Schéma des forces	Les forces (ou) se compensent (pas) Verticalement... Horizontalement...	Si F ₁ > F ₂ , F ₃ , l'objet se déplace dans la direction de F ₁
			T/M et langue naturelle						
				Schéma	Desin de la situation motricelle	DRT	Schéma des forces	Schéma des forces	Schéma des forces
				Forme vectorielle	X	X	Liste des vecteurs forces	$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{0}$	$\vec{F}_{rés} = \vec{F}_{ext}$

Tableau 7-9. Analyse des lois de la mécanique en termes de modélisation et de registres sémiotiques.

Le Tableau 7-9 reprend donc les Tableau 7-1 (p. 106) et Tableau 7-5 (p.115). Les lois de la mécanique (formulées en langue naturelle et étant évidemment un élément du modèle) permettent de faire le lien entre le mouvement et les forces.

3.2. Test développé

Cette partie a donné lieu à un test court (30 minutes) à la fin de la Partie 3. Nous avons créé le premier exercice, qui nous permet de mettre en parallèle la 1^{ère} et la 3^{ème} loi de Newton puisque nous souhaitons voir l'influence de l'enseignement des lois de la mécanique sur l'application du principe des actions réciproques. C'est le développement de cet exercice que nous présentons dans le paragraphe suivant. Le second exercice est inspiré des exercices développés par Millar (2003) sur la chute libre. Cet exercice présente un découpage du raisonnement qui peut être utilisé pour résoudre le problème posé.

Voici le test ainsi obtenu :

Exercice 4
On considère 4 différentes situations (présentées sur la première ligne du tableau). Remplir le tableau :

Système 1 Système 2	Une source soumise à un aléa quelconque dans la haute fréquence. Elle se met en mouvement vers la haute fréquence.	Un système est déformé instantanément vers la vol.	Un point quel à un point fixe par un fil soumis à une glisse en décrivant un cercle.	Une charge soumise à une voltage en permanence une rectiligne à vitesse constante.
	Elle plane Elle glisse	Elle s'élève Elle red.	Le point Le fil	La vitesse La déformation
Les forces qui s'exercent sur le système 1 se compensent	<input type="checkbox"/> VRAI <input type="checkbox"/> FAUX	<input type="checkbox"/> VRAI <input type="checkbox"/> FAUX	<input type="checkbox"/> VRAI <input type="checkbox"/> FAUX	<input type="checkbox"/> VRAI <input type="checkbox"/> FAUX
Justification				
La force exercée par le système 1 sur le système 2 est : quel est le rapport exercé par le système 2 sur le système 1.	<input type="checkbox"/> plus petite <input type="checkbox"/> plus grande <input type="checkbox"/> de même intensité	<input type="checkbox"/> plus petite <input type="checkbox"/> plus grande <input type="checkbox"/> de même intensité	<input type="checkbox"/> plus petite <input type="checkbox"/> plus grande <input type="checkbox"/> de même intensité	<input type="checkbox"/> plus petite <input type="checkbox"/> plus grande <input type="checkbox"/> de même intensité
Justification				

Exercice 2
Une fusée décolle verticalement de la surface de la Terre. A une certaine altitude, elle coupe ses moteurs et continue à monter.
Lorsque des enseignants ont proposé une analyse de la situation du point de vue de la mécanique. Pour chacun des encadrés, cochez la proposition qui vous semble la plus correcte. Justifiez votre choix pour le dernier encadré.

Lorsque la fusée coupe ses moteurs

☐ il y a la force exercée par la Terre sur la fusée (vers la bas) et la force exercée par l'air sur la fusée (vers le bas)
☐ il y a une force verticale vers le haut (qui permet à la fusée de monter) et une force verticale vers la bas (exercée par la Terre)
☐ il n'y a plus de force exercée sur la fusée.

Verticalement

☐ les forces sur la fusée se compensent
☐ les forces sur la fusée ne se compensent pas

A partir de votre réponse dans l'encadré précédent, quelle loi de la mécanique pouvez-vous appliquer pour avoir des informations sur le mouvement de la fusée ?

☐ "Si un système est immobile ou s'il est en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse et sa direction ne varient pas), alors les forces qui s'exercent sur le système se compensent."
☐ "Si les forces qui s'exercent sur un système se compensent, alors le système est immobile ou est en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire que sa vitesse et sa direction ne varient pas)"
☐ "Si un système n'est ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse et/ou sa direction varient), alors les forces qui s'exercent sur le système ne se compensent pas."
☐ "Si les forces qui s'exercent sur un système ne se compensent pas, alors le système n'est ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire que sa vitesse et/ou sa direction varient)".

On en déduit que

☐ la vitesse varie.
☐ la vitesse ne varie pas

La fusée continue à monter

☐ en ralentissant.
☐ à vitesse constante

Justification du choix pour le dernier encadré

3.3. Exemple illustré du développement d'un exercice

Afin de vérifier que les élèves faisaient la distinction entre le principe des actions réciproques (indépendant des caractéristiques de la situation) et les lois de la mécanique (permettant de faire le lien entre forces et mouvement), nous avons demandé aux élèves de les appliquer pour une même situation. Nous avons choisi de proposer différentes situations afin de tester la cohérence des réponses et de pouvoir inférer sur le raisonnement des élèves. Chacune de ces situations correspondait à des combinaisons des mouvements types présentés dans le modèle :

- mouvement non uniforme
- immobilité
- mouvement circulaire
- mouvement rectiligne uniforme

3.4. Analyse a priori de l'exercice

Cet exercice fait intervenir quatre situations de la vie quotidienne, avec des objets inanimés (élastique, pierre, palet, fil, voiture, dépanneuse) et un objet animé (enfant).

Les mouvements ont été choisis car ils représentent les cas caractéristiques présentés dans les lois de la mécanique :

- immobile ou rectiligne uniforme
- la vitesse et/ou la direction varient (respectivement non uniforme et circulaire)

Les questions posées aux élèves sont de deux types. Dans un premier temps, on leur demande si les forces qui s'exercent sur un système donné (qui est animé des mouvements cités ci-dessus) se compensent. Les élèves doivent pour cela utiliser les lois de la mécanique A1 et B1 du modèle.

Rappel :

A. 1. Si un système est immobile ou s'il est en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse et sa direction ne varient pas), alors les forces qui s'exercent sur le système se compensent. **B. 1.** Si un système n'est ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse *et/ou* sa direction varient), alors les forces qui s'exercent sur le système ne se compensent pas.

Ils peuvent ainsi répondre aux questions. Les justifications attendues sont donc ces lois.

Dans un deuxième temps, on demande aux élèves d'utiliser le principe des actions réciproques pour dire que, dans toutes les situations proposées, la force exercée par le système 1 sur le système 2 est de même intensité que la force exercée par le système 2 sur le système 1. Il y a donc pour cette question des informations non pertinentes dans la situation proposée (ce principe est indépendant de la nature des objets et de leur mouvement).

La mise en parallèle de ces deux questions peut avoir un aspect formatif puisque les élèves peuvent réaliser en répondant la différence entre ces deux lois :

- la première permet de faire le lien entre le mouvement et une caractéristique des forces ;
- la deuxième permet de faire le lien entre les caractéristiques de deux forces.

3.5. Analyse du test

3.5.1. Analyse du test des situations proposées

Tableau 7 □ 10. Analyse des situations proposées et des questions posées aux élèves dans le test 3

	Exercice 1	Exercice 2
Situation proposée	quatre situations proposées : une pierre suspendue à un élastique, un enfant immobile sur le sol, un palet qui glisse sur la glace avec un mouvement circulaire, une dépanneuse qui tire une voiture avec un mouvement rectiligne uniforme	une fusée dans les airs qui coupe ses moteurs
Questions	appliquer les lois de la mécanique ; appliquer le principe des actions réciproques	identifier les forces ; passer des caractéristiques des forces à une information sur la compensation ; sélectionner la loi de la mécanique appropriée ; décrire le mouvement
Connaissances, lois, principes testés	lois de la mécanique, principe des actions réciproques	forces, lois de la mécanique

3.5.2. Analyse du test en termes de savoir

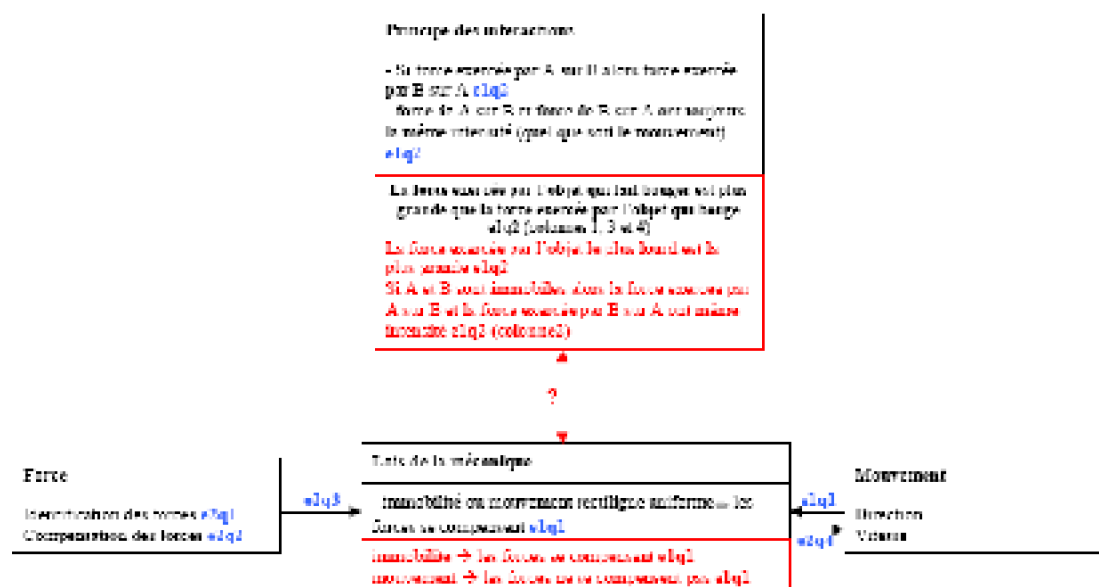


Figure 7-4. Analyse des questions du test 3.

On peut ainsi prévoir les cohérences contextuelles et les cohérences inter-conceptuelles (ici entre lois) testées a priori :

Tableau 7-11. Analyse a priori des cohérences contextuelles mises en jeu dans le test 3

Composante du concept mise en jeu dans le test	Questions où l'élève a à manipuler cette composante
utilisation des lois de la mécanique	e1, e2
du mouvement vers les forces	e1q1 colonnes 1, 2, 3, et 4
des forces vers le mouvement	e2
application du principe des actions réciproques	e1
existence de deux forces	e1q2 colonnes 1, 2, 3, et 4
égalité des forces	e3q1-2, e5q1-2-3-4

Tableau 7□12. Analyse a priori des cohérences inter-lois mises en jeu dans le test 3

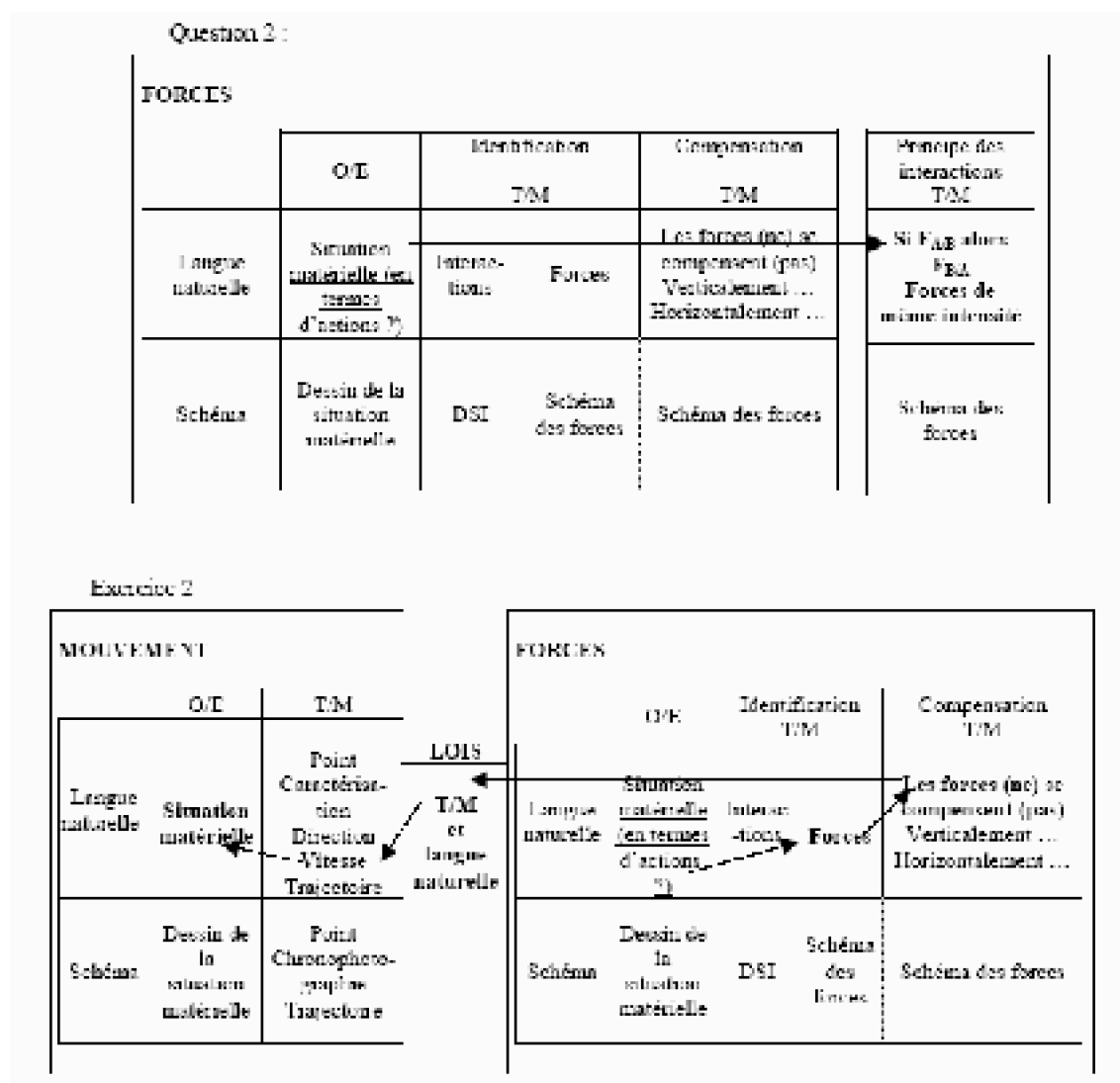
Lien entre les lois mises en jeu dans le test	Questions mettant en jeu ces différentes lois
lien entre lois de la mécanique et principe des actions réciproques	e1q1 et e1q2

3.5.3. Analyse du test en termes de modélisation et de registres sémiotiques

Exercice 1 :

On a rajouté en italique les étapes qui pouvaient être nécessaires aux élèves pour répondre à l'exercice mais qui n'étaient pas demandées explicitement.

Question 1							
MOUVEMENT			FORCES				
	O/E	T/M	LOIS		O/F	Identification T/M	Compensation T/M
Langue naturelle	Situation matérielle	Considérations avec Direction Vitesse Trajectoire	T/M et langue naturelle	Langue naturelle	Situation matérielle (en termes d'accroch ?)	Intensités Forces	Les forces (ne) se compensent (pas) Verticalement ... Horizontalement ...
Schémas	Dessin de la situation matérielle	Chronophoto analyse Trajectoire		Schémas	Dessin de la situation matérielle	DGI Schéma des forces	Schémas des forces



4. Le test bilan

4.1. Un test à part

Ce test a une particularité notable. Il reprend l'ensemble des concepts introduits dans les parties 1, 2 et 3 de la séquence. Nous avons décidé de le faire passer dans des classes supplémentaires afin de voir notamment s'il permettait de tester la compréhension des concepts enseignés dans des classes ayant utilisé une autre séquence d'enseignement.

Cette condition a ajouté à la construction du test une forte contrainte : pour que le test soit acceptable par les enseignants, il fallait enlever tous les aspects du savoir enseigné qui s'éloignaient du programme. Nous avons donc vérifié, avec l'aide d'enseignants familiers au programme officiel et aux spécificités de la séquence, que les questions de ce test étaient conformes au programme. Nous avons principalement supprimé toutes les

questions sur les diagrammes système interaction et sur le principe des actions réciproques.

4.2. Test développé

Exercice 1 : VRAI ou FAUX

Les propositions suivantes sont-elles vraies ou fausses ? Justifier votre réponse.

1. Un caillou se trouve sur le toit d'un camion. Le caillou exerce une force sur le camion.

☐ VRAI ☐ FAUX ☐ on ne peut pas savoir

Justification :

.....

2. Une voiture démarre sur une ligne droite. Sa vitesse est constante.

☐ VRAI ☐ FAUX ☐ on ne peut pas savoir

Justification :

.....

3. Un manteau est suspendu à un portemanteau. Le sol exerce une force sur le manteau.

☐ VRAI ☐ FAUX ☐ on ne peut pas savoir

Justification :

.....

4. Un oiseau vole dans les airs. La Terre exerce une force sur lui.

☐ VRAI ☐ FAUX ☐ on ne peut pas savoir

Justification :

.....

5. Un objet a un mouvement circulaire dans le référentiel terrestre. La direction de son mouvement ne varie pas.

☐ VRAI ☐ FAUX ☐ on ne peut pas savoir

Justification :

.....

6. Un homme nage dans une piscine. La Terre exerce une force sur lui.

☐ VRAI ☐ FAUX ☐ on ne peut pas savoir

Justification :

.....

Evaluer la compréhension des concepts de mécanique chez des élèves de seconde : Développement d'outils pour les enseignants

Exercice 2

Un enfant est perché sur un manège. Le manège est en route et tourne avec une vitesse constante.

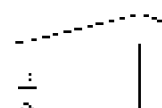
1. Représente le mouvement de l'enfant dans le référentiel Terre.

2. Représente le mouvement de l'enfant dans le référentiel manège.

3. On prend la référentiel Terre comme référentiel galiléen. Les forces qui s'exercent sur le système enfant se compensent-elles ? ☐ Oui ☐ Non ☐ On ne sait pas.

Justification :

.....



Exercice 3

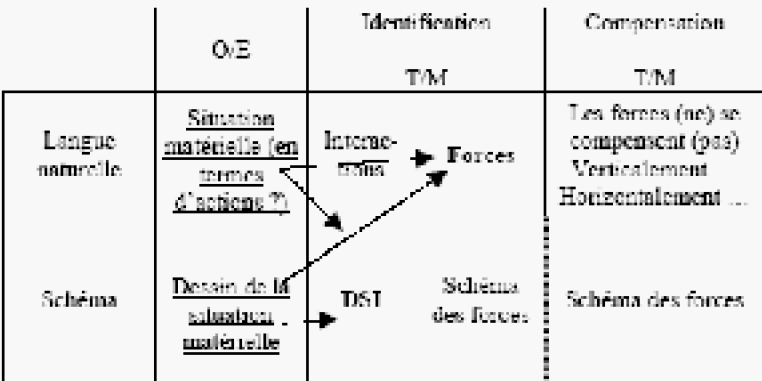
1. Pour chacun des mouvements ci-dessous, cocher sur chaque ligne la première case si la direction est la direction de la vitesse, la deuxième case si la vitesse varie (on pourra avoir 1, 2 ou 3 cases cochées).

mouvement rectiligne uniforme	<input type="checkbox"/> la direction varie	<input type="checkbox"/> la vitesse varie
mouvement circulaire uniforme	<input type="checkbox"/> la direction varie	<input type="checkbox"/> la vitesse varie
mouvement rectiligne non uniforme	<input type="checkbox"/> la direction varie	<input type="checkbox"/> la vitesse varie
immobile	<input type="checkbox"/> la direction varie	<input type="checkbox"/> la vitesse varie

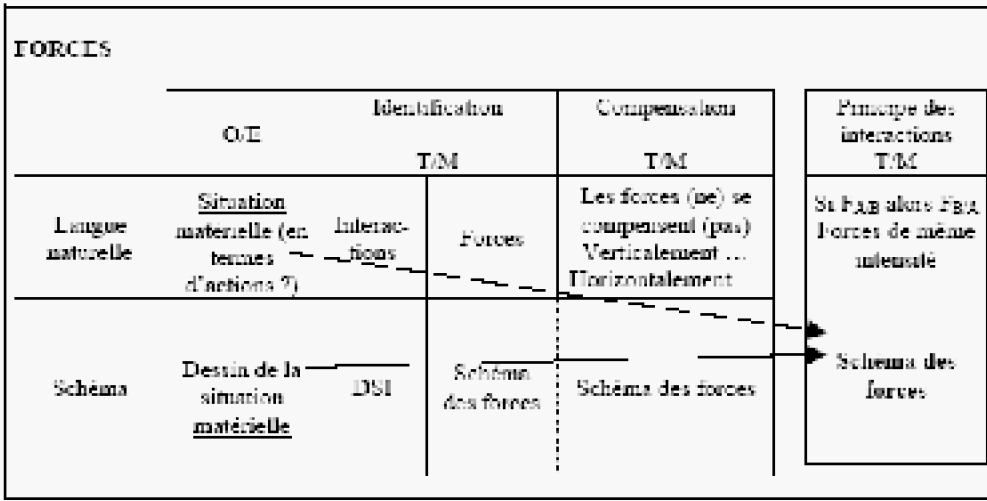
2. On a représenté dans le tableau qui suit des schémas des forces qui s'exercent sur un système S pour trois situations différentes. Pour chacun des schémas des forces, cocher les propositions qui correspondent à un mouvement du système qui vous paraît le plus probable en justifiant à chaque fois votre réponse.

Schéma des forces	Propositions de mouvement (plusieurs choix possibles)	Justification
1 	<input type="checkbox"/> le mouvement est rectiligne uniforme <input type="checkbox"/> le mouvement est circulaire uniforme <input type="checkbox"/> le mouvement est rectiligne non uniforme <input type="checkbox"/> l'objet est immobile	
2 	<input type="checkbox"/> le mouvement est rectiligne uniforme <input type="checkbox"/> le mouvement est circulaire uniforme <input type="checkbox"/> le mouvement est rectiligne non uniforme <input type="checkbox"/> l'objet est immobile	
3 	<input type="checkbox"/> le mouvement est rectiligne uniforme <input type="checkbox"/> le mouvement est circulaire uniforme <input type="checkbox"/> le mouvement est rectiligne non uniforme <input type="checkbox"/> l'objet est immobile	

Exercice 4 :



Exercice 5 :



Exercice 6

Au début d'un match de basket l'arbitre prend le ballon et le jette à la verticale vers le haut.

Dans toute cette question, on s'intéresse à la montée du ballon, une fois que l'arbitre l'a lâché.

Cochez la ou les affirmations qui vous paraissent correctes.

- 1 – Parmi les forces ci-dessous cochez celles qui s'exercent sur le ballon pendant cette phase.
- | | |
|--|--------------------------|
| a) une force verticale vers le haut modélisant l'action de l'air. | <input type="checkbox"/> |
| b) une force verticale vers le bas modélisant l'action de l'air. | <input type="checkbox"/> |
| c) une force verticale vers le haut modélisant l'action de la Terre. | <input type="checkbox"/> |
| d) une force verticale vers le bas modélisant l'action de la Terre. | <input type="checkbox"/> |
| e) une force verticale vers le haut modélisant l'action de la main de l'arbitre. | <input type="checkbox"/> |
| f) une force verticale vers le bas modélisant l'action de la main de l'arbitre. | <input type="checkbox"/> |

Justifiez brièvement votre réponse pour chaque case.

- a :
- b :
- c :
- d :
- e :
- f :

2 – Pendant cette même phase, la vitesse du ballon :

- ☐ augmente.
- ☐ diminue.
- ☐ ne varie pas.

Justifiez par une ou deux phrases votre choix.

.....

.....

4.3. Exemple illustré du développement d'un exercice

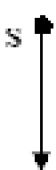
Nous détaillons ici le développement de l'exercice 3.

Nous avons voulu tester la compréhension des lois de la mécanique en faisant passer les élèves du schéma des forces au mouvement. Ce passage est rarement demandé. Lors d'un précédent travail (2001-2002), nous avons remarqué l'absence d'exercices de ce genre dans les manuels scolaires. Nous avons donc créé avec l'aide d'une enseignante un premier exercice qui avait été donné aux élèves en devoir surveillé mais n'avait pas fait l'objet d'une analyse. Cet exercice a été repris et modifié par le groupe SESAMES en 2002-2003 afin d'en faire un exercice disponible pour les enseignants utilisant la séquence. Nous avons alors utilisé la grille d'analyse de la séquence (modélisation, registre sémiotique) afin de reformuler les questions. L'expérience des enseignants avait aussi été mise à profit.

Voici l'exercice produit par SESAMES :

Situation 1. Pour chacune des propositions suivantes (a, b ou c) :

Il peut y avoir plusieurs propositions correctes ou incorrectes.



Proposition a : le mouvement est vertical vers le haut

Proposition b : le mouvement est vertical vers le bas


Proposition c : le système est au repos

Si la proposition est correcte, citez un exemple de situation réelle qui pourrait être représentée par le schéma – nommez les objets en interaction.

Si la proposition n'est pas correcte, expliquez pourquoi à l'aide du principe d'inertie.

Situation 2.

Pour chacune des propositions suivantes, dites si la proposition est correcte ou non et expliquez votre réponse en vous appuyant sur le principe d'inertie.



Proposition a : le mouvement peut être vertical.

Proposition b : le mouvement peut être horizontal.

Proposition c : le système peut être au repos.

Nous avons donc choisi de nous inspirer de cet exercice pour créer un exercice du test « bilan ». Cependant, nous avons procédé à quelques modifications :

- nous avons repris les termes du modèle du mouvement pour les mouvements proposés ;
- nous avons ajouté une situation à deux forces où les forces ne se compensaient pas ;
- nous avons ajouté une partie introductive afin de vérifier que les élèves connaissaient la correspondance entre les mouvements proposés et leur analyse en termes de vitesse et de direction ;
- nous avons proposé une justification libre et ouverte pour ne pas dire explicitement aux élèves qu'il fallait utiliser les lois de la mécanique.

4.4. Analyse a priori de l'exercice

Cet exercice ne propose donc pas de situation matérielle. Tout se passe dans le monde de la théorie et du modèle. La première partie correspond à l'analyse de quatre mouvements en termes de variation de vitesse et de changement de direction (suite à la remarque que nous avons faite quant à la formulation du modèle, il faudrait modifier dans notre exercice les verbes employés). Cette question a deux fonctions :

- **sommative** : elle permet de vérifier que les élèves savent faire le lien entre la description du mouvement, la variation de vitesse et le changement de direction.
- **formative** : elle peut permettre aux élèves de réaliser que ce sont les composantes vitesse et direction qui seront pertinentes pour la suite de l'exercice lois de la

mécanique.

La deuxième partie correspond donc à l'utilisation des lois de la mécanique pour passer des forces au mouvement. On propose trois situations aux élèves :

- le premier schéma ne comporte qu'une seule force et par conséquent on dira que les forces ne se compensent pas. Cela peut représenter une difficulté pour les élèves puisqu'il est difficile de dire « **les** forces » alors qu'il n'y en a qu'une ;
- le deuxième schéma présente deux forces qui ont même direction, même longueur et sens opposés. C'est a priori un cas classique de forces qui se compensent abordé en classe ;
- le troisième schéma est lui aussi *a priori* assez classique puisqu'il comporte deux forces de même direction et sens opposés mais qui ont des longueurs différentes.

Dans le schéma 2, la loi A2 du modèle s'applique directement et permet de dire que puisque les forces se compensent, soit le système est immobile, soit il est en mouvement rectiligne et uniforme mais qu'il ne peut pas être ni en mouvement rectiligne non uniforme ni en mouvement circulaire uniforme.

Dans les schémas 1 et 3, le fait que les forces ne se compensent pas permet d'affirmer à partir de la loi B2 que puisque les forces ne se compensent pas alors le système ne peut ni être immobile ni être en mouvement rectiligne uniforme. Les deux autres possibilités ne sont pas exclues. L'élève pourra essayer de trouver des situations correspondantes. Il est assez facile d'imaginer des situations avec un mouvement rectiligne non uniforme (chute libre, objet lancé vers le haut). Il est plus délicat de trouver des exemples de mouvement circulaire correspondant à ces schémas. Dans le cas du schéma 1, on pourra penser à la Lune en rotation (révolution) autour de la Terre.

Cette représentation vectorielle peut pousser l'élève à confondre les caractéristiques des forces et celles du mouvement (du vecteur vitesse).

Remarque : l'analyse a posteriori nous a montré que cet exercice nécessitait quelques modifications.

4.5. Analyse du test

4.5.1. Analyse des situations proposées

Tableau 7 □ 13. Analyse des situations proposées et des questions posées aux élèves dans le test 4.

Exercice	Exercice 1	Exercice 2	Exercice 3	Exercice 4	Exercice 5	Exercice 6
Situation proposée	6 situations : un caillou sur un camion ; une voiture qui démarre ; un manteau suspendu à un porte-manteau ; un oiseau dans les airs ; un objet en mouvement circulaire ; un homme dans une piscine	un enfant sur un manège	pas de situations matérielles mais des schémas de forces	un palet sur la glace	3 situations : un homme qui pousse une caisse sans que celle-ci ne bouge ; un homme qui met une caisse en mouvement ; une dépanneuse qui tire une voiture avec un mouvement rectiligne uniforme	un ballon lancé vers le haut
Questions	dire si une force donnée est présente ; analyser la situation en termes de variation de vitesse et changement de direction	décrire le mouvement dans différents référentiels ; dire si les forces qui s'exercent sur l'enfant se compensent	faire le lien entre mouvement, vitesse et direction ; dire si les mouvements proposés peuvent correspondre au schéma des forces	faire le schéma des forces	décrire le mouvement ; faire la liste des forces ; dire si les forces se compensent ; faire le schéma des forces	caractériser les forces ; dire comment varie la vitesse
Connaissances, lois, principes testés	forces, vitesse, direction	caractérisation mouvement, lois de la mécanique	lien entre mouvement, vitesse et direction ; lois de la mécanique	forces, lois de la mécanique	caractérisation mouvement, forces, lois de la mécanique	forces, lois de la mécanique

4.5.2. Analyse du test en termes de savoir

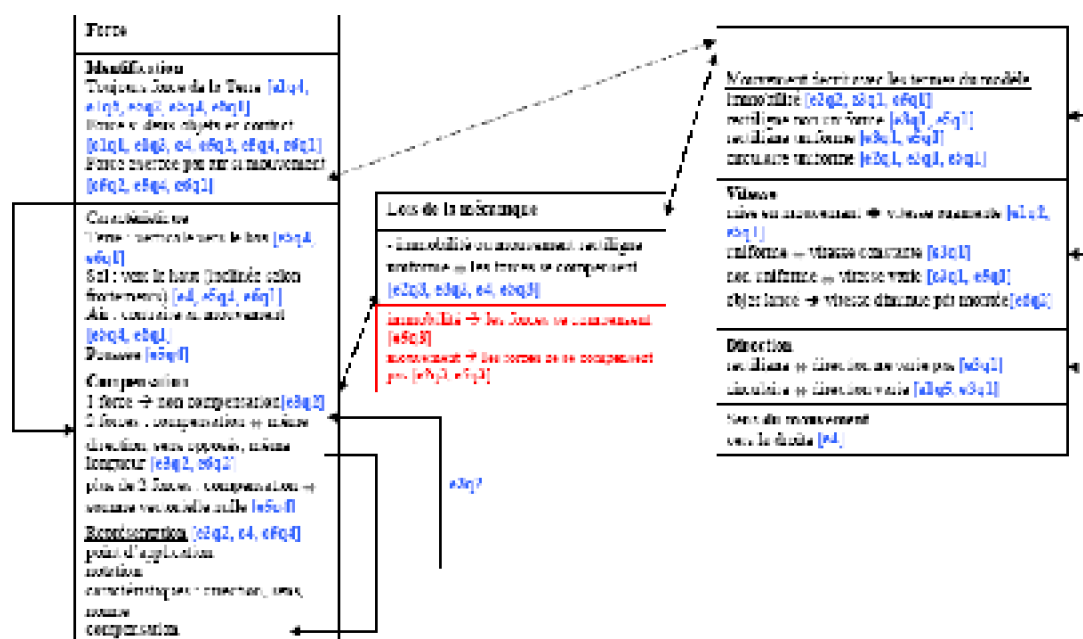


Figure 7-5. Analyse des questions du test 4.

On peut ainsi prévoir les cohérences contextuelles et les cohérences inter-conceptuelles (ici entre lois) testées a priori :

Tableau 7-14. Analyse a priori des cohérences contextuelles mises en jeu dans le test 4

Aspect du concept mis en jeu dans le test	Questions où l'élève manipule cet aspect conformément à la physique enseignée
description d'un mouvement dans un référentiel donné	e2q1-2, e5q1, e6q2
lien entre description mouvement, variation de vitesse et variation de direction dans un référentiel	e1q2, e1q5, e3q1
identification des forces	e1, e4, e5, e6
forces de contact	e1q1, e4, e5q2
force exercée par la Terre	e1q4, e1q6, e5q2, e6q1
force exercée par l'air	e6q1, e5q2
pas de force dans le cas de non-contact	e1q3, e4, e6
caractéristique des forces	e4, e5, e6
force exercée par la Terre	e5q4, e6q1
force exercée par l'air	e5q4, e6q1
force de support, de réaction	e4, e5q4
force de frottement	e4, e5q4
force de traction, de poussée	e5q4
représentation de la compensation des forces	e4, e5q4
utilisation des lois de la mécanique	e2, e3, e4, e5, e6
du mouvement aux forces	e2q3, e4, e5q3
des forces au mouvement	e3q2, e6q2

Tableau 7 □ 15. Analyse a priori des cohérences inter-composantes mises en jeu dans le test 4

Lien entre les lois mises en jeu dans le test	Questions mettant en jeu ces différentes lois
lien entre liste des forces, compensation et schémas des forces	e3, e5

4.5.3. Analyse du test en termes de modélisation et de registres sémiotiques

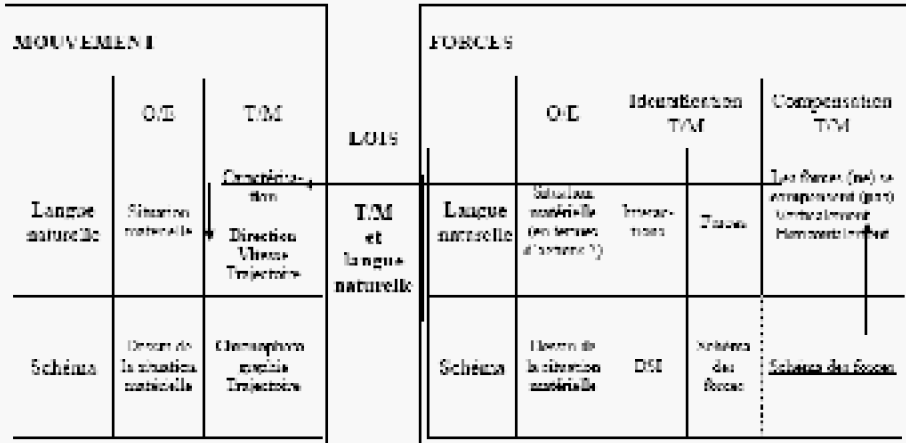
Exercice 1

MOUVEMENT			FORCES			
	O/E	T/M		O/E	Identification T/M	Compréhension T/M
Langue naturelle	Situation matérielle	Caractérisa- tion Direction Vitesse Trajectoire		Langue naturelle	Situation matérielle (en termes d'action ?)	Les forces (ne) se composent (pas) Verticalement Horizontalement...
Schémas	Dessin de la situation matérielle	Chronophoto- graphie Trajectoire		Schémas	Dessin de la situation matérielle	LOI Schéma des forces

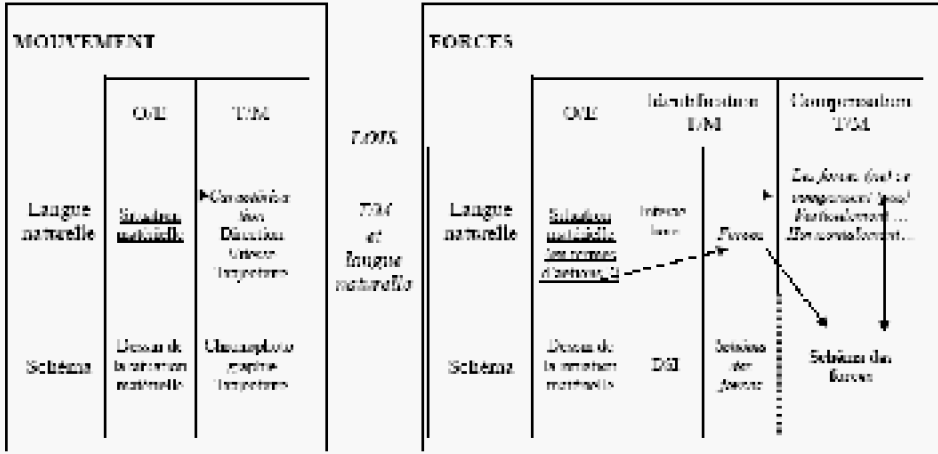
Exercice 2 :

MOUVEMENT			LOIS	FORCES			
	O/E	T/M			O/E	Identification T/M	Compréhension T/M
Langue naturelle	Situation matérielle	Caractérisa- tion Direction Vitesse Trajectoire	T/M et langue naturelle	Langue naturelle	Situation matérielle (en termes d'action ?)	Intéra- ctions Forces	Les forces (ne) se composent (pas) Verticalement Horizontalement
Schémas	Dessin de la situation matérielle	Chronophoto- graphie Trajectoire		Schémas	Dessin de la situation matérielle	LOI Schéma des forces	Schéma des forces

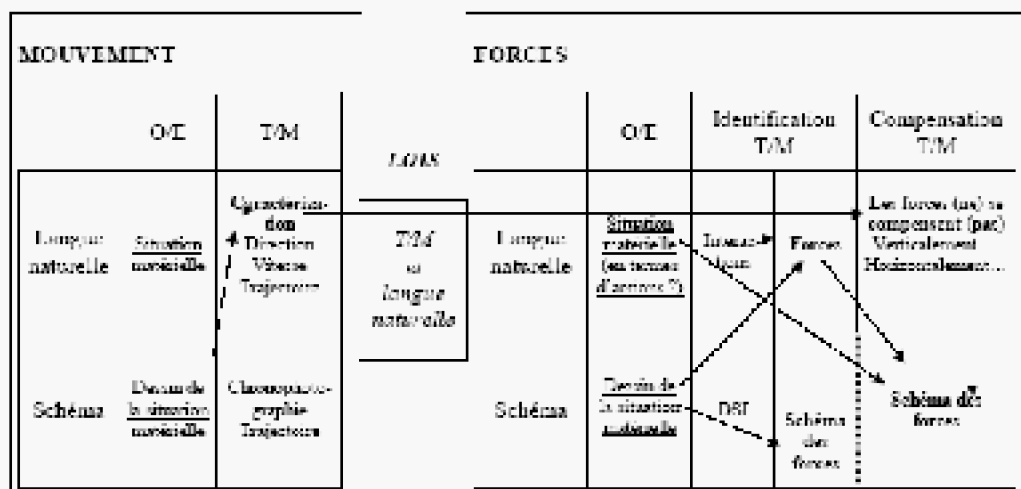
Exercice 3 :



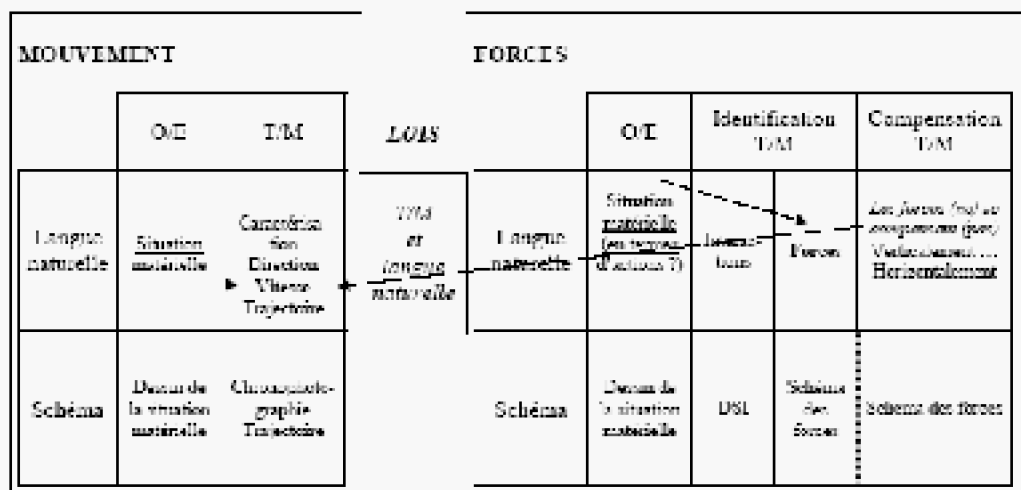
Exercice 4 :



Exercice 5 :



Exercice 6 :



Chapitre 8 : Ensemble des quatre tests : cohérence et croisements a priori

Ces tests sont conçus pour pouvoir être donnés indépendamment mais peuvent aussi être donnés tous les quatre. Dans le cas d'élèves ayant répondu aux quatre tests, il est possible de suivre l'évolution de leurs réponses à propos d'un même concept.

Comme nous l'avons vu :

- le premier test contient des exercices évaluant uniquement le concept de mouvement ;
- le deuxième test contient des exercices évaluant uniquement le concept de force ;

- le troisième test contient des exercices mettant en jeu les lois de la mécanique et évaluant certaines composantes du concept de force ;
- le quatrième test est un test bilan et contient des exercices évaluant le concept de mouvement, le concept de force et l'utilisation des lois de la mécanique.

Il est donc a priori possible de suivre les réponses des élèves :

- sur le concept de mouvement entre le test 1 et le test 4 ;
- sur le concept de force entre le test 2, le test 3 et le test 4 ;
- sur les lois de la mécanique entre le test 3 et le test 4.

Cette évolution peut être un indicateur de l'évolution de la maîtrise des concepts avec les temps. Il s'agit de l'évaluation de la cohérence temporelle. Il peut être intéressant de regarder si un élève qui semblait bien maîtriser un concept dans ses réponses à un test (évaluation par la cohérence contextuelle) le maîtrise toujours dans un test suivant. On peut aussi analyser l'évolution des cohérences contextuelles afin de voir s'il y a des progressions.

Mouvement	Point	T1e3
	Vitesse	T1e1&2&3 ; T4e1&6
	Trajectoire	T1e2&3
	Mouvement	T1e1&2&3 ; T4e1&2&3&5
Forces	Identification	T2e1&4
	Interactions Forces	T2e4 ; T3e2 ; T4e1&5&6
	Représentation (schéma)	T2e2 ; T4e4&5
	Principe des actions réciproques	T2e3&5 ; T3e1
Lois de la Mécanique	Mouvement → Forces	T3e1 ; T4e2&4&5
	Forces → Mouvement	T3e2 ; T4e3

Tableau 8-1. Bilan des composantes évaluées dans différents tests.

Conclusion

Voici les questions de recherche auxquelles nous souhaitons répondre dans notre partie développement :

Sur quelles bases peut-on construire des exercices d'évaluation de la compréhension 1. conceptuelle ?

Comment la méthodologie de développement de la séquence peut-elle être réutilisée 2. pour le développement d'outils d'évaluation ?

Quelles sont les contraintes à respecter pour que ces outils soient acceptables par 3. l'enseignant ?

Il s'agissait donc pour nous de développer une méthodologie de construction de tests dont l'objectif était d'évaluer la compréhension par les élèves des concepts enseignés.

Afin de nous assurer que les outils que nous allions produire permettaient bien d'évaluer cette compréhension (**question 1**), nous avons dans un premier temps spécifié l'ensemble des composantes des savoirs à évaluer. Pour cela, nous avons effectué une analyse du programme et de la séquence d'enseignement pour identifier les différents concepts introduits, la façon dont ils étaient présentés, les composantes mises en évidence, etc. Nous avons ainsi pu distinguer dans l'enseignement de mécanique de Seconde les concepts de mouvement et de force et les lois de la mécanique qui permettent de faire le lien entre ces deux concepts. Pour ces trois éléments (concept de mouvement, concept de force, lois de la mécanique), nous avons repéré les différentes composantes présentées dans la séquence d'enseignement ainsi que les différents liens entre ces composantes. Nous avons ainsi obtenu une sorte de « carte conceptuelle » des différents éléments à évaluer.

Il s'agissait ensuite de vérifier l'adéquation a priori entre ce qui était à évaluer (que nous avons identifié) et la façon dont les questions devaient être posées. Pour les différents éléments à évaluer, nous avons ainsi procédé à une analyse selon plusieurs approches :

- une première approche consistait à analyser les tests de mécanique existants (issus des travaux de didactique pour la plupart) afin de voir les méthodes d'évaluation utilisées pour ces mêmes concepts. Nous avons ainsi vu l'importance d'évaluer plusieurs fois la même composante afin de pouvoir effectuer des croisements (étude de cohérence) à partir des réponses des élèves. Les différentes situations matérielles proposées dans les énoncés de ces tests ont de plus été une source pour nos exercices.
- une deuxième approche était centrée sur l'utilisation d'hypothèses d'apprentissage afin de s'assurer que ce qui était demandé à l'élève nécessitait qu'il mette en jeu sa compréhension pour répondre. Ainsi nous avons pris soin de demander aux élèves de :
 - passer du champ expérimental au modèle et inversement car nous savons que l'établissement de tels liens est nécessaire à la construction du sens des concepts en physique (Tiberghien, 1994) ;
 - mobiliser les concepts enseignés sur différentes situations du champ expérimental car la compréhension conceptuelle ne peut être réduite à une seule situation matérielle ;
 - manipuler différentes représentations d'un même concept (et nous avons donc fait varier les registres sémiotiques proposés aux élèves dans l'énoncé et demandés aux élèves dans leur réponse) car la compréhension d'un concept nécessite de pouvoir passer d'une forme de représentation à une autre (Duval, 1995).
- la troisième et dernière approche consistait à prendre en compte les difficultés des élèves sur les concepts enseignés. Ces difficultés ont été mises en évidence lors des nombreux travaux sur les conceptions. Proposer des situations pour les quelles les

travaux montrent que l'élève mobilise souvent un modèle « naïf » pour répondre voire proposer des réponses alternatives (dans le cas de questions à choix multiple) permet de vérifier que l'élève s'est bien approprié le modèle enseigné et n'utilise pas ces modèles « alternatifs » souvent issus de l'intuition.

Enfin la méthodologie devait bien évidemment tenir compte de la demande des enseignants. Pour produire un outil fonctionnel, il faut que celui-ci soit utilisable facilement par l'enseignant. Il nous a donc fallu analyser les pratiques d'évaluation des enseignants de physique au lycée afin de pouvoir tenir compte des contraintes liées à ces pratiques.

Cette méthodologie permet de répondre à la **question 1**. Elle est utilisable dans le cas de tout développement d'outils d'évaluation, même si l'analyse du savoir est ici particulièrement adaptée à la séquence d'enseignement. En ce sens, la méthodologie répond aussi en partie à la **question 2** puisque les hypothèses d'apprentissage utilisées lors du développement des tests sont celles utilisées lors du développement de la séquence. Ces hypothèses représentent à la fois une contrainte mais elles sont surtout un véritable guide à la production des tests. Certains éléments du cadre théorique de la construction de la séquence (telle que la dévolution) n'ont pas été repris car, bien qu'utiles dans le cas de développement d'activités d'apprentissage, ils ne sont pas pertinents pour construire des activités d'évaluation. Nous avons repris d'autres éléments du cadre théorique de la construction de la séquence tels que :

- la modélisation : les auteurs de la séquence ont développé des activités qui permettent à l'élève de créer des liens entre ce qui relève des deux mondes. Il est possible de reprendre cette hypothèse en vérifiant que les élèves sont capables en situation d'évaluation d'établir de tels liens.
- les registres sémiotiques : les activités proposées dans la séquence mettent en jeu différentes représentations des concepts enseignés. Les auteurs ont par exemple proposé des activités mettant en jeu des chronophotographies (pour le mouvement), des diagrammes système interaction et des schémas des forces (pour la force) et bien sûr des explications en langue naturelle pour l'ensemble des concepts et lois enseignés.
- les difficultés des élèves : les auteurs ont tenu compte des difficultés des élèves pour créer des activités qui permettent aux élèves de dépasser ces conceptions et de voir en quoi le modèle proposé par la physique est incompatible avec certaines d'entre elles. Il est donc important de vérifier que les élèves ne mobilisent plus ces conceptions au moment de répondre aux questions d'évaluation.

Comme nous l'avons indiqué plus haut, il est nécessaire de tenir compte des contraintes de l'évaluation telle qu'elle est pratiquée par l'enseignant si nous voulons produire des outils fonctionnels (**question 3**). Voici les principales contraintes dont nous avons tenu compte :

- le devoir doit avoir un programme de révision précis et en lien avec ce qui a été fait en classe ;
- le test doit être réalisable dans une durée prédéterminée (généralement une heure à

ce niveau) ;

- le test doit évaluer ce qui est jugé important par l'enseignant ;
- l'énoncé doit être compréhensible par la quasi-totalité des élèves ;
- la forme des questions ne doit pas être trop éloignée de celle des questions habituellement utilisées ;
- l'enseignant doit pouvoir facilement constituer un barème sur 20 points et donner une note à chacun de ses élèves. Les notes sur l'ensemble de la classe ne doivent pas être trop hautes ni trop basses.

Nous avons ainsi construit 4 tests pour la séquence de mécanique développée dans le cadre du projet Outils. Ces tests utilisent les résultats de la recherche, ils sont adaptés à la séquence d'enseignement qu'ils accompagnent et tiennent compte de la pratique des enseignants. Nous espérons ainsi avoir produit un outil riche, fonctionnel et valide. C'est ce que nous vérifions dans la partie suivante.

Partie 3 Analyse des tests

Après avoir construit nos tests d'évaluation, nous les avons proposés à des enseignants afin de voir si ces outils pouvaient fonctionner dans les classes. Ces tests ont été donnés à des élèves comme évaluation notée pendant l'enseignement de mécanique. Nous avons aussi mené quelques entretiens d'élèves ayant répondu aux tests. Nous présentons dans le chapitre 9 les raisons de cette méthodologie de recueil de données ainsi que les données que nous avons ainsi recueillies.

Le chapitre 10 expose la méthodologie de validation, c'est-à-dire de la façon dont nous avons analysé les données recueillies pour valider nos tests. Après avoir exposé les objectifs de cette analyse, nous présentons les différentes étapes de l'analyse des réponses écrites et des entretiens.

Le chapitre 11 présente ensuite les résultats obtenus par l'analyse des différents tests selon cette méthodologie. Nous donnons dans ce chapitre les performances des élèves aux différents tests (tris à plats et croisements), que nous confirmons par les résultats obtenus à partir de l'analyse des entretiens.

Le chapitre 12 présente enfin une synthèse de ces résultats et montre en quoi cette analyse nous a permis de vérifier que nos tests étaient fonctionnels, fiables et pertinents pour évaluer la compréhension des élèves.

Chapitre 9 : Recueil de données

1. Passation des tests

Nous voulons évaluer la compréhension des élèves sur les concepts de mécanique enseignés. Pour cela, nous avons développé quatre tests qui nous permettent d'évaluer les élèves à différents moments de l'enseignement. Afin de suivre l'évolution des réponses des élèves, il était important d'avoir un certain nombre d'élèves qui réponde à l'ensemble des quatre tests.

Une enseignante (enseignante A) et un enseignant (enseignant B) ont accepté de faire passer à leurs élèves de Seconde l'ensemble des quatre tests développés. L'enseignante A avait deux classes de Seconde (classe A1 et classe A2). L'enseignant B avait une classe de Seconde (classe B).

Le Tableau 9-1 présente l'effectif de ces trois classes, réparti selon le genre :

		genre		Total
		filles	garçon	
classe	A1	11	17	28
	A2	28	4	32
	B	7	27	34
Total		46	48	94

Tableau 9-1. Répartition des élèves dans les trois classes étudiées.

On voit dans le Tableau 9-1 que les trois classes comportaient au total 94 élèves dont environ 50% de filles et 50% de garçons (cette parité n'est pas respectée dans chacune des classes).

Le Tableau 9-2 présente l'effectif d'élèves ayant répondu à chacun des tests puis à l'ensemble des quatre tests (un élève a été absent à deux tests) ainsi que les dates de passation de ces tests dans chacune des classes.

Tableau 9-2. Effectif d'élèves ayant répondu à chacun des tests et à l'ensemble des quatre tests et calendrier de passation des tests dans les trois classes étudiées.

	Nombre d'élèves ayant répondu au test	Date de passation		
		A1	A2	B
Test 1	94	03/02/2004	11/03/2004	11/03/2004
Test 2	91	27/02/2004	23/03/2004	24/03/2004
Test 3	90	16/03/2004	02/04/2004	02/04/2004
Test 4	93	23/03/2004	22/04/2004	22/04/2004
Ensemble des quatre tests	87			

On a donc un échantillon de réponses allant de 90 à 94 élèves pour chaque test et un échantillon de 87 élèves sur l'ensemble des quatre tests (pour nous permettre d'étudier l'évolution des réponses).

Nous souhaitons voir si ce type de tests pouvait servir à évaluer d'autres élèves, provenant de classes ayant suivi des enseignements différents (séquence Outils ou pas). En plus des trois classes étudiées, nous avons donc fait passer le test 4 (« test bilan ») à dix classes supplémentaires. Le Tableau 9-3 présente les élèves ayant passé ce test.

classe	établissement		effectif		Enseignement	Date de passation du test 4
	Identi- fication	Caracté- risation ⁺	nombre de filles	nombre de garçons		
A1	1	-	10	17	Outils	22/04/2004
A2	1		28	4		22/04/2004
B	2	-	7	27		23/03/2004
C1	3		9	23		25/03/2004
C2	3	=	4	26		25/03/2004
D	4		22	11		01/01/2004
E1	4	-	19	15		du 17 au 21 mai 2004 ?
E2	4		16	19		
E3	4		21	8		
L	5	-	14	14		fin mai 2004
H	2	-	14	14	autre	29/03/2003
I	5	-	11	16		05/05/2004
J	6	-	4	26		30/03/2003
Total			180	214		

Tableau 9-3. Présentation de l'ensemble des treize classes ayant passé le test 4. *
Comparaison de la proportion de bacheliers parmi les sortants de 2^{nde}, 1^{ère} et T^{le} de
l'établissement par rapport à la moyenne de l'Académie (71%)

Notre échantillon se compose donc d'élèves provenant de 13 classes différentes, réparties sur 6 établissements. Nous avons indiqué quelques informations sur le type d'établissement en nous basant sur la proportion de bacheliers parmi les sortants de 2^{nde}, 1^{ère} et T^{le} dans cet établissement comparée à la même proportion dans l'Académie de l'établissement. Pour l'année 2003, dans l'Académie de Lyon dont font partie les établissements 1 à 4, la proportion de bacheliers parmi les sortants de 2^{nde}, 1^{ère} et T^{le} est de 71%. Dans l'établissement 2, cette proportion est de 78%. Dans

l'établissement 5, cette proportion est de 42%.

Nous ne prétendons pas avoir un échantillon représentatif. Les indications de genre sont présentées pour décrire brièvement l'échantillon. Nous avons un total de 394 élèves pour lesquels nous avons analysé les réponses écrites au test 4. La parité (fille-garçon) n'est pas totalement respectée sur cet échantillon.

Pour les classes E1 à E3 (même enseignant), nous n'avons pas noté les dates exactes de passation du devoir pour chacune des classes mais seulement la semaine où les trois classes l'ont fait. Pour la classe L, l'enseignant nous a remis les photocopies des copies de ses élèves début juin mais ne nous a pas précisé la date de passation.

L'intérêt de ce tableau est aussi de montrer que, malgré le Programme Officiel qui indique un calendrier, la fin de l'enseignement de mécanique s'étale sur environ deux mois.

2. Entretiens

2.1. Choix méthodologique : le recours aux entretiens

Nous voulions savoir dans quelle mesure les réponses données à l'écrit par les élèves étaient un bon indicateur de leur compréhension du problème posé et permettaient d'émettre un jugement sur leurs connaissances en mécanique. Afin de vérifier la validité de ces tests, nous n'avons pas souhaité faire une validation interne à partir des réponses écrites aux tests mais plutôt une validation externe (cf. cadre théorique, chapitre 1) en comparant les réponses écrites à une autre source d'information. Nous avons choisi une source d'information orale en menant des entretiens individuels avec les élèves ayant répondu par écrit au test.

Notre objectif était de vérifier que le contenu du discours oral était cohérent avec les réponses écrites. Les entretiens devaient nous permettre de savoir quelles connaissances les élèves avaient mobilisé au moment du test et s'ils étaient toujours d'accord avec leurs réponses. Nous souhaitons donc utiliser une méthode d'entretien qui ne demande pas à l'élève « pourquoi » il avait ainsi répondu au test mais plutôt « comment » il avait répondu. Nous nous sommes donc inspirés de la méthode d'entretiens d'explicitation de Vermersch (1996), déjà utilisée par Coppé (1993) dans son travail sur les processus de vérifications chez des élèves en situation de devoir surveillé de mathématiques. Notre objectif était d'aider l'élève à se replonger dans la situation du devoir surveillé et de verbaliser son action au moment de la production de la réponse. Le principe de ces entretiens est de questionner l'élève pour le guider dans l'évocation. Afin d'aider l'élève dans cette évocation, nous avons mis à sa disposition l'énoncé du test ainsi qu'une photocopie de sa réponse écrite.

2.2. Préparation des entretiens

2.2.1. Choix des questions

Afin de préparer les entretiens, nous devons choisir des questions à valider plus spécifiquement. Il ne nous était en effet pas possible d'interviewer tous les élèves pour tous les tests. La première étape de la sélection a été l'analyse a priori des questions. Cette analyse, présentée dans le chapitre précédent, utilisait notamment les recherches sur les difficultés et les conceptions des élèves afin de prévoir les réponses possibles des élèves.

Nous avons uniquement interviewé les élèves des classes A1 et A2. Le décalage de passation entre la classe B d'un côté et les classes A1 et A2 (cf. Tableau 9-2) nous a permis d'analyser dans un premier temps les réponses de la classe B. Nous avons regardé les réponses effectives des élèves (analyse empirique des réponses) dans cette classe. Nous avons ainsi créé une première version de catégories de réponses pour les questions ouvertes. A partir de cette analyse, nous avons sélectionné les questions et les types de réponses associées pour lesquelles nous souhaitions avoir des validations et des renseignements supplémentaires. Il s'agissait en particulier des réponses qui nous semblaient délicates à interpréter. Lors de l'analyse des réponses des élèves des classes A1 et A2, nous avons ainsi les critères pour sélectionner les élèves que nous souhaitions interviewer. Cette préparation nous a permis de réaliser rapidement cette sélection ainsi que les entretiens avant que l'enseignant fasse la correction en classe.

2.2.2. Choix des élèves

Dès le début de l'enseignement, nous avons demandé aux parents de remplir deux autorisations : une autorisation d'interviewer leur enfant et une autorisation de diffuser des extraits d'enregistrements vidéo des entretiens sur Internet. La deuxième autorisation n'était pertinente que si la première avait été acceptée. Sur les deux classes, seuls 31 élèves sur 60 ont été autorisés à être interviewés dont seulement 20 pour lesquels nous pouvions diffuser des extraits. Cette condition était une limite forte pour nous. Nous avons cependant été amenés à interviewer certains des 11 élèves pour lesquels nous n'avions pas l'autorisation de diffusion.

Nous ne voulions pas forcer les élèves à participer à ces entretiens et nous leur avons donc demandé leur accord. Concrètement, à partir de leur réponse écrite, nous avons sélectionné plus d'élèves que nous ne voulions en interviewer et avons demandé à l'enseignante de suivre l'ordre de la liste pour demander aux élèves. L'enseignante nous a donné son point de vue sur le niveau général des élèves sélectionnés en physique, en utilisant les notations suivantes : --, -, +/-, +, ++ (de « très faible » à « très bon »). Ceci était utile pour avoir un échantillon d'élèves interviewés avec des niveaux variés. Si un élève refusait, l'enseignante demandait à l'élève suivant jusqu'à obtenir le nombre d'élèves que nous avions fixé. La synthèse des élèves qui avaient l'autorisation d'être interviewés est présentée en Annexes.

Nous avons ainsi la liste des élèves que nous pouvions interviewer. Pour chacun de ces élèves, nous avons regardé si ses réponses écrites aux tests répondaient aux critères définis ci-dessus, c'est-à-dire si ses réponses écrites étaient délicates à interpréter.

2.3. Réalisation des entretiens

2.3.1. Elèves interviewés

Pour le test 1, nous avons interviewé huit élèves (élèves 3, 4, 10, 17 (A1), 21, 23, 25, 27 (A2)) parmi lesquels quatre élèves considérés comme des élèves faibles par l'enseignante, un élève considéré comme un élève moyen, un élève considéré comme un bon élève et deux élèves considérés comme des très bons élèves. Chaque élève a été interviewé pendant environ trente minutes.

Pour le test 2, nous avons interviewé cinq élèves (élèves 7, 8 (A1), 19, 22, 29 (A2)) parmi lesquels un élève « faible », deux élèves « moyens » et deux élèves « très bons ». Chaque élève a été interviewé pendant environ trente minutes.

Pour des contraintes de temps, nous n'avons pas pu interviewer les élèves sur le test 3. En effet, ce test a été passé juste avant les vacances et le test 4 devait être donné à la rentrée. Nous avons donc décidé de poser des questions sur ce test 3 pendant l'entretien du test 4 (si le temps le permettait), même s'il avait déjà été corrigé en classe. Nous avons interviewé huit élèves pour le test 4 (élèves 6, 12, 16 (A1), 20, 21, 23, 28, 31 (A2)) parmi lesquels deux élèves « faibles », un élève « moyen », trois élèves « bons » et deux élèves « très bons ». Chaque élève a été interviewé pendant environ une heure. Nous avons eu le temps de poser des questions sur le test 3 pour trois élèves (élèves 12, 28 et 31, parmi lesquels deux élèves « très bons » et un élève « moyen »).

Pour le test 4, nous souhaitions interviewer des élèves d'une autre classe. Nous avons demandé à l'enseignant E de choisir pour nous des élèves de niveaux variés dans ses trois classes. Nous avons ainsi interviewé cinq élèves de plus (un élève « très bon », deux élèves « bons », un élève « moyen » et un élève « en difficulté »).

2.3.2. Conduite des entretiens

Nous avons sélectionné pour chaque élève, à partir de leur copie, les questions sur lesquelles nous voulions des informations en priorité. Nous avons demandé à chaque élève, en consultant s'il le souhaitait sa réponse écrite, d'explicitier la façon dont il avait répondu à ces questions. Cependant, en voyant certains élèves tentés de commenter leurs réponses pour le test 1, nous avons essayé de ne pas donner immédiatement la copie à l'élève, mais seulement l'énoncé vierge, lors des premiers entretiens du test 2. Cette expérience ne s'est pas avérée concluante car il était très difficile pour les élèves de se souvenir exactement de leur réponse. Nous avons donc décidé de revenir à notre première méthode en étant plus rigoureux sur le contenu du discours de l'élève afin de bien le réorienter vers l'explicitation (au lieu du commentaire). Nous essayions de poser en majorité des questions de type « Comment ? » plutôt que « Pourquoi ? ». L'hypothèse sous-jacente est qu'une question en « Pourquoi ? » pousse à la justification et ramène l'interviewé dans le présent, incite au discours sur son comportement plutôt qu'à l'explicitation de son action. L'élève n'avait pas de contrainte précise quant à l'utilisation de la copie et/ou de l'énoncé. Ces documents étaient mis à leur disposition pour faciliter l'évocation mais nous leur laissions la liberté dans leur utilisation. Certains élèves ont par exemple systématiquement relu l'énoncé à voix haute sans que nous le leur demandions.

Puisque nous nous intéressions à l'influence de la situation de devoir surveillé, nous

souhaitions avoir aussi des informations que l'élève n'était pas amené à nous donner spontanément. Nous avons donc demandé aux élèves (à la fin de l'entretien le plus souvent possible) de nous donner des informations supplémentaires du type :

- Quelle était la difficulté du test ?
- Était-il sûr de ses réponses ?
- Est-ce qu'il avait trouvé le devoir long ?

3. Synthèse des données recueillies

Tableau 9-4. Synthèse des données recueillies.

	Classes où le test a été passé	Nombre d'élèves ayant répondu au test	Nombre d'élèves interviewés après le test
Test 1 : le mouvement	3 classes : A1, A2, B	94	8 (4 A1 + 4 A2)
Test 2 : interaction et forces	3 classes : A1, A2, B	91	5 (2 A1 + 3 A2)
Test 3 : les lois de la mécanique	3 classes : A1, A2, B	90	8 (3 A1 + 5 A2)
Test 4 : test bilan	13 classes : 3 + 10 (A1, A2, B, C1, ..., L)	394 (93 + 301)	5 (2 E1 + 1 E2 + 2 E3)

L'ensemble des données présentées dans le Tableau 9-4 permettent à la fois une analyse quantitative et une analyse qualitative de nos tests. Le grand nombre d'élèves ayant répondu par écrit à chacun des tests est une condition nécessaire pour valider la fonctionnalité de l'outil et vérifier que les réponses écrites des élèves peuvent être utilisées pour évaluer leur compréhension. Les entretiens permettent de vérifier pour un certain nombre d'élèves que ces réponses écrites sont un bon indicateur de leur compréhension. Pour que cette analyse soit valable, il faut s'assurer d'avoir des élèves de niveaux variés, représentant les différents niveaux présents dans la classe (« en difficulté », « moyen », « bon », « très bon »). Pour cela, le point de vue de l'enseignant sur le niveau de l'élève ainsi qu'une analyse rapide de sa copie nous permettent de sélectionner les élèves à interviewer.

Chapitre 10 : Méthodologie de validation

1. Fonctionnalité

La méthodologie utilisée pour construire les tests et plus particulièrement l'utilisation d'exercices issus du Force Concept Inventory ou du « Diagnosing Pupils' Understanding »

donnent à ces tests une certaine originalité par rapport à ceux utilisés habituellement dans les classes. Nous avons vu dans le cadre théorique (Chapitre 1) que les exercices utilisés par les chercheurs étaient différents de ceux utilisés par les enseignants, même si certains de leurs objectifs d'évaluation étaient communs. Nous avons choisi dans nos tests de proposer des exercices inspirés des pratiques des chercheurs mais adaptés à la pratique des enseignants. Il est important de noter que ces exercices, vu leur originalité, n'auraient pas pu être créés ni même probablement sélectionnés par l'enseignant pour évaluer ses élèves.

Nous voulions produire un outil utilisable par l'enseignant au même titre que n'importe quel devoir surveillé et qui puisse donner lieu à une note qui s'intègre dans la moyenne de l'élève. La fonctionnalité de ces tests dans la classe n'étant pas une évidence, le premier critère de validation est que ces tests soient utilisables dans les classes et fonctionnels pour l'enseignant.

2. Validité de l'outil test d'évaluation

Comme nous l'avons vu dans la partie théorique (chapitre 1, p.34), un outil d'évaluation peut être validé en analysant différentes caractéristiques. Nous avons choisi de nous centrer sur la valeur des indicateurs choisis pour savoir si l'élève a acquis les connaissances de base de mécanique et pour cela d'utiliser une méthode de validation externe.

Pour valider nos tests comme outils d'évaluation des connaissances des élèves en mécanique, nous devons vérifier que les performances des élèves aux tests sont des bons indicateurs de leur compréhension. Pour cela, nous devons d'abord obtenir des résultats par le biais de nos tests en analysant les réponses écrites des élèves afin d'inférer sur leurs connaissances en mécanique et leur compréhension des concepts enseignés. Afin de valider ces résultats, les entretiens sont analysés pour vérifier la cohérence entre le contenu de la réponse écrite de l'élève et le contenu de son discours oral lors de l'entretien. L'ensemble de ces analyses (résultats obtenus par l'analyse des réponses écrites et validation de ces résultats par les entretiens) est un moyen de valider nos tests comme un outil d'évaluation (voir Figure 10-1).

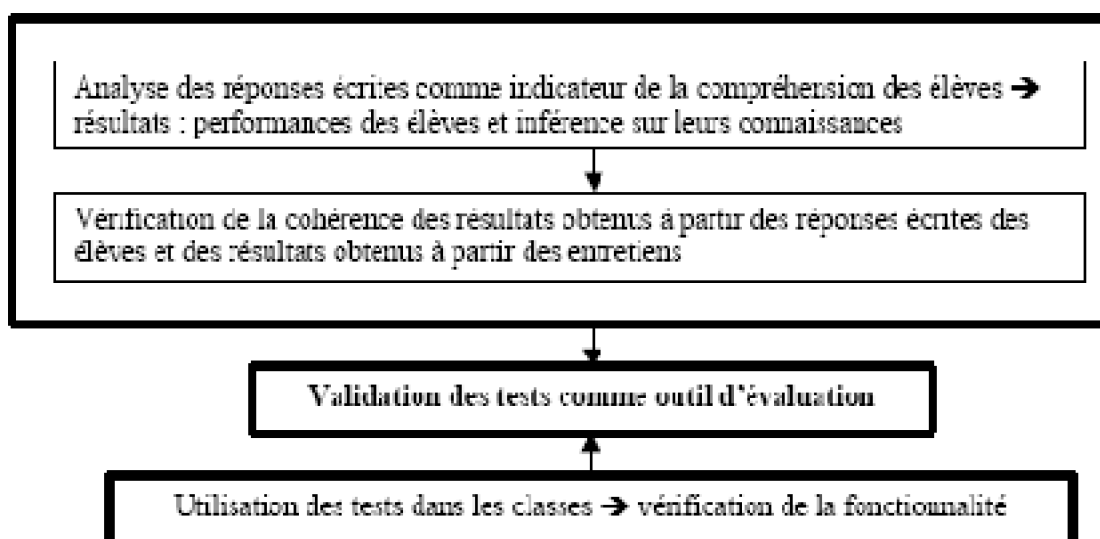


Figure 10 □ 1. Méthodologie de validation des tests comme outil d'évaluation.

2.1. Méthodologie d'analyse des réponses écrites

2.1.1. Catégorisation

Une première étape consiste à catégoriser les réponses aux questions ouvertes. Pour cela, l'analyse du savoir (cf. Partie « Production des tests », chapitre 6) et le recensement des conceptions des élèves sur les concepts abordés sont un outil précieux.

Nous avons choisi de catégoriser assez finement les réponses aux questions ouvertes. L'analyse empirique des réponses nous a permis de choisir des catégories qui comprenaient au minimum 90% des réponses des élèves. Ces catégories fines peuvent ensuite être regroupées selon ce que nous cherchons à analyser. Il était important d'avoir des catégories communes à certaines questions afin de pouvoir comparer les réponses d'un même élève. Par exemple, lorsqu'on demande aux élèves de justifier l'existence ou la non-existence d'une force (test 4, exercice 1), on utilise pour l'ensemble de ces questions les mêmes catégories. Ces catégories sont présentées dans le Tableau 10-1.

**Evaluer la compréhension des concepts de mécanique chez des élèves de seconde :
Développement d'outils pour les enseignants**

Code	Catégorie	Code	Catégorie
pas de justification		référence aux interactions	
10	pas de justification	111	objets en interaction
20	"je ne sais pas"	112	objets pas en interaction
30	pas réponse	113	toujours interactifs
40	inexploitable	114	interaction de contact
description sans information		115	contact
100	déviation sans information	116	pas contact
110	conséquence de la force	117	on se sait pas s'ils sont en contact
111	action des forces	118	interaction à distance
référence à la force exercée par la Terre		119	toujours interaction à distance
211	toujours force exercée par la Terre	140	actions réciproques
212	objet attiré par la Terre	141	A/R dans R/A
213	objet tombe, colle	142	les forces se compensent
2131	raisonnement par l'absurde : tombe, colle	144	"principe des actions réciproques" ou "A/R dans R/A"
214	objet pas attiré par la Terre	150	NSP
2141	objet pas attiré car dans l'eau	référence à une force standard	
2142	objet pas attiré car dans l'air	410	c'est le poids
215	aggravité de la Terre, voir la Terre, etc.	411	proximité
2151	utilisation de référentiel dans le sens 215	412	pesanteur
216	la planète est dans la Terre	413	attraction
référence à une action		414	force gravitationnelle
311	modifie le mouvement	420	c'est la réaction
312	empêche le mouvement	430	c'est la tension
313	causes possibles	raisonnement par l'absurde	
314	action objet peut sur autre	510	si pas de force...
3141	si une masse dans exerce une force	511	si force
315	permet le mouvement	520	si pas de système rien de changer
316	arrête l'objet	ça dépend...	
317	agit par l'attraction	600	ça dépend
318	tous les objets exercent une force	610	du système étudié
référence à une autre force		620	de l'objet
251	pas la même la Terre	630	du poids
252	existence d'une autre force	640	de la masse
253	liste des forces	650	de la taille
260	ref. à force exercée par système étudié	660	ça dépend du mouvement
261	support retient donc objet agit	670	ça dépend du référentiel
262	support agit mais pas retient	jeu sur les mots	
270	négligeable	700	jeu sur les mots
271	caillon pas assez lourd, raie trop petite	710	pas sur objet mais sur partie
		800	montrer utilisation du "référentiel"
		900	autre

Tableau 10-1. Catégories des réponses écrites des élèves pour la justification de l'existence d'une force.

Ces catégories sont regroupées différemment selon les questions. Voici les catégories de regroupement pour les questions 1, 4 et 6 de l'exercice 1 du test 4 :

Tableau 10-2. Catégories regroupées pour les justifications de l'existence des forces.

Enoncé de la question	« Un caillou se trouve sur le toit d'un camion. Le caillou exerce une force sur le camion. »	« Un oiseau vole dans les airs. La Terre exerce une force sur lui. » « Un homme nage dans une piscine. La Terre exerce une force sur lui. »
Catégories regroupées	- interaction de contact - principe des actions réciproques - raisonnement par l'absurde - action - attraction gravitationnelle - attiré par la Terre	- toujours force exercée par la Terre - attraction - interaction à distance - raisonnement par l'absurde - agit sur le mouvement - actions réciproques - force standard

Ces catégories sont inspirées de l'analyse du contenu de l'enseignement et modifiées par l'analyse empirique des réponses des élèves.

2.1.2. Traitement SPSS

Vu le nombre important de réponses écrites des élèves (environ 100 à 400), nous avons décidé d'utiliser un logiciel de traitement statistique (*SPSS*).

Ce traitement présente plusieurs avantages ; il permet :

- d'avoir toutes les données regroupées dans un même fichier donc facilement transportables et communicables (plus facilement que 400 copies d'élèves) ;
- de générer des traitements statistiques de base sur les variables définies notamment l'obtention de la fréquence de chaque catégorie pour chaque variable ;
- de créer de nouvelles variables à partir des réponses des élèves, en cumulant l'information contenue dans plusieurs variables ou de recoder une variable selon différentes catégories ;
- de croiser des variables afin de voir si on a certaines corrélations.

Par exemple, à partir d'une variable correspondant aux catégories présentées dans le Tableau 10-1, nous pouvions utiliser les fonctions du logiciel pour générer automatiquement une nouvelle variable correspondant aux catégories de regroupement (Tableau 10-2).

Nous disposons de deux fichiers SPSS (disponibles en Annexes) :

- le premier correspond aux réponses des 94 élèves des classes A1, A2 et B à l'ensemble des quatre tests (environ 600 variables définies pour chaque élève) ;
- le deuxième correspond aux réponses des 394 élèves au test 4 (environ 350 variables définies pour chaque élève).

Ces deux fichiers contiennent des informations communes : les réponses des élèves des classes A1, A2, et B au test 4.

2.1.3. Fréquences et croisements

Grâce à ces fichiers et aux fonctions proposées par le logiciel SPSS, il était facile pour chaque variable de générer les fréquences correspondant à chacune des catégories préalablement définies. Dans le cas d'une question à choix multiple, en plus des catégories correspondant aux choix proposés à l'élève, on rajoute les deux catégories « pas de réponse » ou « plusieurs cases cochées ». Par exemple, pour la question 4 de l'exercice 1 du test 4 (« Un oiseau vole dans les airs. La Terre exerce une force sur lui. »), on a cinq catégories correspondant à la variable « réponse des élèves à cette question » :

VRAI	1.
FAUX	2.
On ne peut pas savoir	3.
Plusieurs cases cochées	4.
Pas de réponse	5.

La catégorie 5 « pas de réponse » est à part puisqu'elle peut être comprise ou non dans les calculs de pourcentage. Nous avons décidé de compter les cas de « non-réponse », qui représentent selon nous un indicateur de la difficulté d'un exercice.

L'objectif de la question 4 de l'exercice 1 du test 4 est de savoir si l'élève identifie la force exercée par la Terre sur un objet à proximité de sa surface, ici un oiseau dans les airs. Il est intéressant de croiser la réponse à cette question avec la réponse à la question 6 du même exercice (« Un homme nage dans une piscine. La Terre exerce une force sur lui. »). Les catégories de réponses sont identiques. On peut utiliser la fonction « tableau croisé » du logiciel SPSS. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 10-3.

		réponse à la question 1.6 (un homme dans une piscine)				Total
		vrai	faux	on ne peut pas savoir	pas de réponse	
réponse à question 1.4 (un oiseau dans les airs)	vrai	322	24	14	5	365
	faux	7	11	2	2	22
	on ne peut pas savoir	2	1	1	0	4
	pas de réponse	2	1	0	0	3
Total		338	37	17	7	394

Tableau 10-3. Croisement des réponses obtenues aux questions 4 et 6 de l'exercice 1 du test 4.

On voit dans le Tableau 10-3 que sur les 394 qui ont eu à répondre au test 4, trois n'ont pas répondu à la question 1.4 et sept n'ont pas répondu à la question 1.6. On voit aussi que 322 élèves (soit 81,7% des élèves qui ont eu à répondre) ont donné la bonne réponse pour les deux questions. On remarque ici l'intérêt de poser deux questions testant a priori la même compétence : le taux de réussite à la question 1.4 est de 84,5%, le taux de réussite à la question 1.6 est de 92,6% et le taux de réussite aux deux questions est de 81,7%. Compte-tenu de ces résultats, on peut conclure que la situation

proposée dans la question 1.6 (un homme dans une piscine) pose plus de difficultés aux élèves puisqu'il y a plus d'élèves qui n'ont pas répondu et plus d'élèves qui ont répondu de manière incorrecte.

Le recours au taux de réussite (pourcentage d'élèves qui répondent correctement à la question posée) permet d'avoir un aperçu du degré de difficulté des questions. Ce taux de réussite est d'ailleurs appelé « indice de facilité » par Chastrette (1989). Ceci peut être un outil pour donner à l'enseignant une référence, une idée de ce qu'il peut attendre de ses élèves. Il faudra bien sûr qu'il tienne compte des particularités de sa classe (niveau général, temps passé à enseigner ce point, etc.) pour réajuster cette référence.

Les fréquences présentent aussi un avantage pour le chercheur. Elles permettent de distinguer les questions qui ne posent pas de problème des questions plus délicates. Si ces résultats diffèrent des travaux sur les difficultés des élèves, il sera intéressant de chercher à comprendre la raison de cet écart. C'est aussi un point de repère pour orienter la discussion lors des entretiens. Après s'être assuré que ce qui semble acquis est confirmé par les entretiens, on pourra passer plus de temps à essayer de comprendre les difficultés sous-jacentes aux questions auxquelles l'élève n'a pas pu répondre ou a mal répondu.

Le recours aux croisements permet d'améliorer la fidélité des inférences faites à partir des réponses (Black, 1998b) puisque les réponses des élèves sont très variables selon le contexte de la situation proposée dans l'exercice. Les croisements donnent une idée du taux de réussite moyen sur l'ensemble des questions ayant le même objectif.

2.2. Méthodologie d'analyse des entretiens

Les entretiens sont principalement utilisés pour confirmer les résultats obtenus à partir de l'analyse de la réponse écrite. Ils représentent en plus une source d'informations supplémentaires qui permettent de mieux comprendre le fonctionnement de l'élève en situation de devoir surveillé. La méthodologie d'analyse des entretiens doit permettre ces deux fonctions (cf. Figure 10-2).

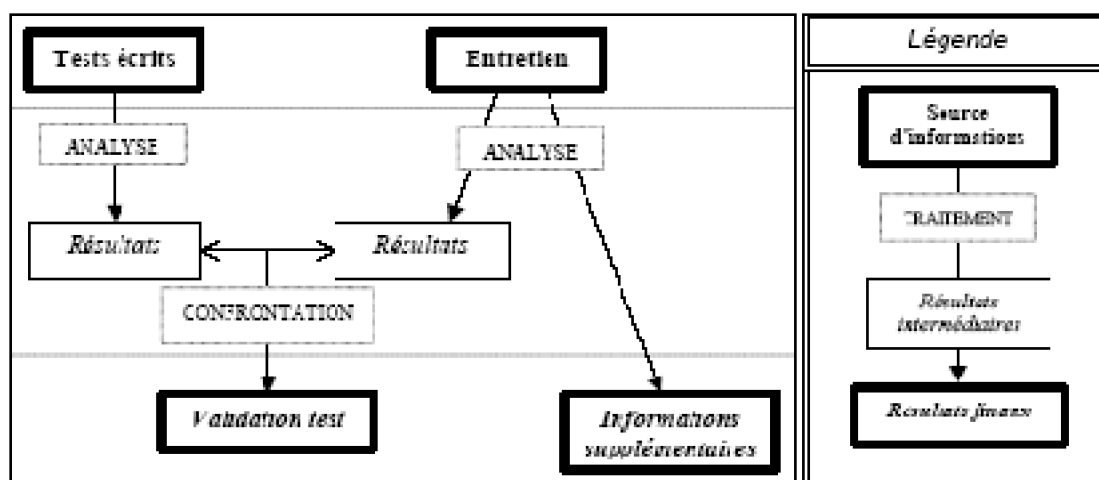


Figure 10-2. Rôle des entretiens dans la méthodologie (à droite figure la légende)

2.2.1. Sélection

Pour des contraintes de temps, il n'était pas possible d'analyser tous les entretiens que nous avons faits. Nous avons dans un premier temps sélectionné ceux qui nous semblaient les plus pertinents pour notre analyse, selon les critères suivants :

- la qualité des enregistrements ;
- le niveau des élèves (afin de conserver des élèves à niveaux variés) ;
- la capacité des élèves à expliciter leurs réponses ;
- la variété de « comportements » des élèves (afin d'avoir des informations variées sur les stratégies des élèves) ;
- le fait que les élèves aient participé à plusieurs entretiens.

Le Tableau 10-4 présente la synthèse des élèves interviewés et sélectionnés pour notre analyse.

Classe	n° de l'élève	Prénom de l'élève	Genre	Niveau	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
A2	23	Anne	fille	+	X			X
A2	21	Arthur	garçon		X			X
A2	27	Lucy	fille	+/-	X			
A2	19	Annelie	fille	++		X		
A2	29	Charlotte	fille	-		X		
A1	8	Roland	garçon	+/		X		
A2	28	Imène	fille	+/-			X	X
A2	31	Claire	fille	++			X	X
A1	12	Julien	garçon	++			X	X
E3	XXX	Georgia	fille	-				X
E2		Alice	fille	++				X
E3		Sally	fille	++				X

Tableau 10-4. Récapitulatif des élèves interviewés et sélectionnés pour l'analyse.

Nous avons ainsi sélectionné trois élèves pour le test 1, trois élèves pour le test 2, et huit élèves pour le test 4 (dont trois pour le test 3). Ces quatorze entretiens correspondent aux entretiens de douze élèves puisque deux élèves ont été interviewés pour les tests 1 et 4.

2.2.2. Transcription

Tous ces entretiens ont été transcrits mais nous n'avons pas transcrit les premières minutes (entrée et accueil de l'élève). A la fin de ces entretiens, nous avons décidé de consacrer quelques minutes afin d'expliquer aux élèves interviewés certaines de leurs erreurs. Cette phase d'explication a été enregistrée sur la vidéo mais n'a pas été transcrite sauf lorsque l'élève complétait son explication sur certains points du contrôle.

2.2.3. Analyse des entretiens

Nous avons utilisé le contenu du discours oral pour vérifier que celui-ci était cohérent avec

le contenu des réponses écrites des élèves. Pour cela, nous avons essayé de voir si les réponses orales des élèves ainsi relevées étaient dans la même catégorie que la réponse écrite correspondante. Des exemples seront donnés dans l'analyse effective des tests.

Afin d'étudier les éléments relatifs à la situation de devoir surveillé qui peuvent influencer les réponses des élèves, nous avons aussi relevé les différents éléments du discours correspondants. Le Tableau 10-5 montre un extrait de l'entretien mené avec l'élève Claire (pour le test 4).

Tableau 10-5. Extrait d'entretien d'élève dont le contenu est relatif à la situation de devoir surveillé.

Tour de parole	Temps	Locuteur	Contenu du discours	Eléments d'analyses
8		C	encore ce l'autre interro je dis pas mais celle-là j'étais malade je dois avouer j'ai un peu répondu au pif	conditions de passation
9		I	c'est vrai	
10		C	<i>RIRES</i> j'avais tellement mal à la tête que j'ai un peu bâclé les trucs	

L'extrait proposé ici illustre l'influence des conditions de passation sur la réponse de l'élève. En plus des informations sur les conditions de passation, nous avons relevé les informations sur les stratégies de résolution de problème (représentation du problème, rôle de ce qui a été fait en classe, influence des autres questions du test) ainsi que sur l'influence de la nature publique et évaluée de la réponse sur la manière dont l'élève répond.

Chapitre 11 : Analyse et résultats

Nous présentons ici notre analyse des tests. Nous avons choisi de faire la validation de chaque test indépendamment. Pour le test 1, nous présentons dans un premier temps l'analyse de l'ensemble des réponses écrites puis l'analyse des entretiens afin d'illustrer chaque étape de la méthodologie de validation. Pour les tests suivants (test 2, test 3 et test 4), nous avons choisi une présentation plus thématique selon les différentes composantes des concepts évalués. Les résultats obtenus par l'analyse des réponses écrites puis les résultats obtenus à partir de l'analyse des entretiens sont successivement exposés.

1. Test 1

Nous présentons ici les analyses des réponses écrites des élèves puis les analyses des réponses orales données en entretiens. Cette présentation permet d'illustrer l'intérêt des différents traitements des données présentés dans la méthodologie. Nous indiquons pour

chacun d'entre eux l'intérêt que de tels résultats peuvent présenter pour l'enseignant.

1.1. Résultats obtenus à partir des réponses écrites

1.1.1. Fréquences

L'analyse des réponses des élèves en termes de fréquences (directement pour les questions fermées ou après catégorisation pour les questions ouvertes) permet d'avoir accès au taux de réussite (nombre d'élèves ayant donné la réponse correcte attendue divisé par le nombre total d'élèves ayant répondu aux tests). Ce taux de réussite est un indicateur de la difficulté des questions.

Voici les questions du test 1 (cf. Partie « Construction des tests », p.101) qui sont très bien réussies par les élèves (plus de 90% de bonnes réponses) :

- Exercice 1, question b (quelle est la voiture la plus rapide ?) : 97% des élèves ont répondu que la voiture violette était la voiture qui avait la vitesse la plus grande.
- Exercice 2, questions b et c (caractérisation de la vitesse et du mouvement des deux caisses) : 90% des élèves ont répondu que la caisse A avait sa vitesse qui augmentait et 97% ont répondu que son mouvement était rectiligne non uniforme ; 97% ont dit que la caisse B avait sa vitesse qui était constante et 96% ont répondu que son mouvement était rectiligne uniforme.

Après cette séquence, il apparaît donc que la quasi-totalité des élèves sait comparer la vitesse de deux objets sur l'ensemble d'un trajet (pour une situation pas trop complexe) et interpréter une chronophotographie en termes de variation de vitesse et de description du mouvement (résultat déjà observé dans un rapport sur l'évaluation pédagogique en fin de troisième (les dossiers d'éducation et formations, 1997)).

Voici les questions qui semblent avoir posé plus de difficultés (moins de 60% de bonnes réponses) :

- Exercice 1, question a (caractérisation du mouvement des voitures) : 51% des élèves ont répondu que la voiture verte avait un mouvement rectiligne non uniforme.
- Exercice 3, tableau (description de la trajectoire, de la variation de vitesse et du mouvement de l'enfant dans différents référentiels) : dans le référentiel « voiture », 60% des élèves ont répondu que l'enfant avait pour trajectoire un point et 56% ont répondu que sa vitesse était nulle ; dans le référentiel « un autre enfant sur le manège », 46% des élèves ont répondu que l'enfant avait pour trajectoire un point et 54% ont répondu que l'enfant était immobile ; dans le référentiel « maman », 49% des élèves ont répondu que l'enfant avait pour trajectoire un cercle.

Nous voyons que, dans l'ensemble, après cette séquence, les élèves ont encore des difficultés à « visualiser » le mouvement, la trajectoire ou la variation de vitesse pour certains référentiels (autres que ceux « équivalents » au référentiel terrestre). L'interprétation de la première difficulté soulevée (décrire le mouvement de la voiture verte) n'est pas immédiate.

1.1.2. Catégorisation

La catégorisation des réponses ouvertes permet à l'enseignant d'anticiper le type de réponses qu'il peut attendre. Elle peut aider à distinguer les réponses correctes et complètes des réponses acceptables mais incomplètes. Elle peut donc être une aide à la constitution d'un barème et à la notation des réponses des élèves.

Pour l'exercice 1, question c (justification de la question précédente : « quelle est la voiture qui a la vitesse la plus grande dans le référentiel Terre ? »), voici les catégories que nous avons conçues ainsi que les fréquences correspondantes :

1.	Même durée distance plus grande.	51 (54%)
2.	Même départ distance plus grande.	21 (22%)
3.	Distance plus grande.	9 (10%)
4.	Si même vitesse 1m50 or voiture violette 2m.	6 (6%)
5.	Autre.	7 (7%)

Ces catégories ont été construites à partir de l'analyse du savoir mis en jeu dans la séquence (la vitesse a été présentée comme une relation entre une distance parcourue et une durée mise pour parcourir cette distance, cf. Partie « Production des test », chapitre 6, p.85) mais aussi des réponses des élèves (nous n'avons pas prévu a priori la catégorie 4).

La catégorie indiquée en gras a été considérée comme acceptable du point de vue de la physique, puisqu'elle correspond vraiment à la vitesse telle qu'elle est présentée dans le modèle. Les trois suivantes ne sont pas forcément incorrectes mais elles sont au moins incomplètes. La catégorie 2 correspond à une justification où le temps est présent sous la forme « instant » et non sous la forme « durée ». La catégorie 3 correspond à une justification où le temps n'est pas du tout présent.

1.1.3. Croisements : réussite au test et cohérences

Réussite au test

On a considéré qu'il y a avait 28 questions pour ce test : 4 pour l'exercice 1 (3 cases à cocher plus une question ouverte), 8 pour l'exercice 2 et 16 pour l'exercice 3. Sur ces 28 questions, on a regardé si les réponses des élèves étaient correctes ou non : 95% des élèves ont répondu correctement à plus de la moitié des questions. 51% des élèves ont répondu correctement à plus des trois-quarts des questions. C'est donc un test assez bien réussi. Ce résultat permet à l'enseignant d'avoir une référence pour la difficulté globale du test.

Cohérence entre trajectoire, variation de vitesse et mouvement

Comme nous l'avons vu dans l'analyse du concept de mouvement (cf. Partie « Production

des tests », p.87), le concept de mouvement tel qu'il est enseigné peut être décomposé en deux composantes : la trajectoire et la vitesse. Pour une même situation et un même référentiel, il est donc intéressant d'évaluer la cohérence des réponses des élèves dans la description de la trajectoire, la description de la variation de vitesse et la description du mouvement.

Pour l'exercice 2, la cohérence entre les trois réponses est quasi-parfaite puisque tous les élèves qui ont représenté une trajectoire ont répondu que la trajectoire était rectiligne, et parmi eux, tous sauf un ont répondu selon la règle vitesse constante / mouvement uniforme, vitesse diminue / mouvement non uniforme et vitesse augmente / mouvement non uniforme.

Dans l'exercice 3, la cohérence est moins bonne. Le Tableau 11-1 présente l'effectif des élèves qui ont répondu de manière cohérente et l'effectif des élèves qui ont répondu de manière incohérente pour chacune des colonnes du tableau.

Tableau 11-1. Cohérences des réponses des élèves dans l'exercice 3 du test 1.

colonne	1	2	3	4	5
nombre d'élèves ayant donné des réponses cohérentes (bonnes ou mauvaises) aux trois questions	58	73	73	61	67
nombre d'élèves ayant donné des réponses incohérentes aux trois questions	33	20	21	30	27

On voit qu'en moyenne 25% des élèves ne répondent pas de manière cohérente, c'est-à-dire ne mettent pas en œuvre le lien entre trajectoire, variation de vitesse et mouvement. Le pourcentage diminue légèrement dans les cas (plus simples) où le référentiel est le centre du manège.

Si on regarde sur l'ensemble des colonnes, seuls 34 élèves (soit 36,2%) ont donné systématiquement (5 fois sur 5) une description du mouvement cohérente avec la trajectoire et la variation de vitesse.

On peut penser que la cohérence entre ces trois composantes du mouvement ne pose pas de problème dans le cas d'un référentiel terrestre mais qu'elle devient plus complexe dans les autres référentiels.

Dépendance de la trajectoire, de la variation de vitesse et du mouvement par rapport au référentiel

Dans l'exercice 3, on demande aux élèves de décrire la trajectoire, la variation de vitesse et le mouvement du point représentant un enfant sur un manège.

Afin de savoir si les élèves ont bien compris que chacune de ces composantes était dépendante du référentiel, on peut croiser les réponses des élèves pour voir si les élèves ont répondu la même chose dans les différents référentiels.

Le Tableau 11-2 présente seulement les élèves qui ont indiqué la même trajectoire, la

même variation de vitesse ou le même mouvement dans les différents référentiels pour une même situation.

	même trajectoire dans les différents référentiels		même variation de vitesse dans les différents référentiels		même mouvement dans les différents référentiels	
	nombre d'élèves	trajectoire	nombre d'élèves	vitesse	nombre d'élèves	mouvement
Pour le manège en train de se mettre en route (colonnes 1 et 2)	13	cercle	28	augmente	13	circulaire non uniforme
	5	point	2	constante	6	immobile
Pour le manège en route (colonnes 3, 4 et 5)	7	cercle	1	nulle	1	autre
	1	point	54	constante	13	circulaire uniforme
Pour les deux situations	6	cercle&cercle	2	constante & constante	6	circulaire non uniforme & circulaire uniforme
	1	point&point	26	augmente & constante		

Tableau 11-2. Effectif des élèves ayant donné des réponses « indépendantes » du référentiel.

On voit dans le Tableau 11-2 qu'il y a plus d'élèves pour qui la variation de vitesse semble indépendante du référentiel. En effet, presque un tiers des élèves (28 élèves sur 91) ne semblent pas tenir compte du référentiel dans la description de la variation de vitesse alors que seulement 6 ou 7 élèves ne tiennent pas compte du référentiel dans la description de la trajectoire ou du mouvement. On note que sur les 54 élèves ayant décrit la vitesse comme constante dans les trois dernières colonnes, certains ont donné la bonne réponse puisque l'énoncé donné dans la classe B ne distinguait pas « constante » de « nulle ». Cependant, on a toujours un plus grand nombre d'élèves qui donnent une variation de vitesse indépendante du référentiel qu'une trajectoire ou un mouvement indépendant du référentiel.

On peut essayer d'expliquer cette différence. On peut faire l'hypothèse que la vitesse est prise au sens non-métrique (Crépault, 1989), c'est-à-dire que l'élève est dans la notion de vitesse déduite directement de la situation. Il analyse alors la situation en regardant si les objets « vont vite » ou « ne vont pas vite » et il y a peu de chance qu'il arrive à tenir compte d'un référentiel. Crépault souligne que cette notion de vitesse est acquise très tôt chez les enfants, qui savent qu'il faut se dépêcher pour arriver plus tôt.

Au contraire, quand l'élève regarde la trajectoire ou le mouvement, il est plus contraint de raisonner en se demandant par rapport à quoi l'objet se déplace.

1.2. Analyse des entretiens

1.2.1. Comparaison écrit/oral

Pour chaque question du test 1, nous avons comparé pour les trois élèves interviewés (Anne, Arthur et Lucy) la réponse écrite et le contenu du discours oral. Voici quelques

exemples :

Elève	Question	Réponse écrite	Extrait d'entretien
Arthur	Exercice 1, question a (décrire les mouvements des deux voitures)	La voiture verte a un mouvement rectiligne uniforme. La voiture violette a un mouvement rectiligne non uniforme.	« alors la voiture verte pour euh j'ai mis mouvement rectiligne uniforme parce qu'en fait euh elle se déplace à vitesse constante en en ligne droite » « euh par rapport à la voiture violette j'ai mis qu'elle était rectiligne non uniforme parce que elle se déplaçait sur un mouvement sur une ligne droite mais pas à vitesse constante en fait parce que y a un plus gros y a une plus grosse distance par rapport à la vitesse où elle va en fait »
Anne	Exercice 2, question e (Justification de la question « les caisses ont-elles la même vitesse ? »)	« Les caisses ont été à un moment de l'intervalle 3 à 4, à la même vitesse car si on prend les points les plus proches de l'intervalle 3 et 4 (donc les points 2 et 5) on remarque qu'ils sont au même niveau. »	« pour euh la question d euh ben je pense que oui à un moment entre l'intervalle trois et quatre parce que si on prend l'intervalle enfin les les points qui sont plus proches des points trois et quatre c'est les points deux et cinq et quand on les regarde ben les deux caisses elles sont au même endroit au même moment donc euh si on regarde la vitesse euh des points trois et quatre entre les points deux et cinq ben je dirais qu'à un moment c'était les mêmes »
Lucy	Exercice 3, colonne 4 (situation : après un tour de manège, référentiel : un autre enfant)	La trajectoire du point représentant l'enfant est ... un point.	« donc un autre enfant sur le manège il voit un un point vu que les manèges ils sont en rond donc il est derrière lui ou devant lui il voit un point donc en fait c'est comme pour le premier j'ai pensé que l'enfant il bougeait pas qu'il avait aucune vitesse euh aucune trajectoire »

Ces exemples illustrent que les élèves n'ont pas répondu au hasard mais peuvent donner des justifications pour le choix de leur réponse. On voit bien dans ces exemples la cohérence entre le contenu de la réponse écrite et le contenu du discours oral.

Parfois, les élèves interviewés changeaient d'avis sur leur réponse mais ils n'ont jamais dit avoir marqué quelque chose alors qu'ils pensaient autre chose. On peut dire que, dans l'ensemble, les réponses orales des trois élèves interviewés viennent confirmer l'analyse faite à partir de leur réponse écrite.

Nous n'avons rencontré qu'une seule réponse écrite qui menait à la conclusion inverse de la réponse orale : l'analyse de l'entretien avec Arthur met en avant le fait qu'une réponse qui paraissait parfaitement correcte à l'écrit – *le point choisi est le centre de gravité (question 1 de l'exercice 3)* – se révèle incorrecte dans l'entretien puisque

l'élève parle en fait du centre de gravité du manège. Il semble alors confondre point choisi pour représenter un objet et référentiel puisqu'il dit que le centre de gravité du manège permet de voir le mouvement de l'enfant. Comme nous l'avions indiqué dans l'analyse a priori de cette question, elle n'est pas très adaptée à évaluer les élèves sur leur compréhension de la sélection du point pour représenter l'objet. Il faudrait donc la transformer et rajouter une autre question dans un autre contexte.

L'analyse de ces trois entretiens a permis de voir que les points qui semblaient acquis par les élèves l'étaient et que les points qui ne semblaient pas acquis ne l'étaient effectivement pas dans la plupart des cas.

1.2.2. Lien entre l'ensemble des réponses écrites et le contenu du discours oral

Le contenu du discours oral est beaucoup plus riche d'informations et beaucoup plus précis sur la compréhension de l'élève. En effet, l'élève dit plus de choses à l'oral qu'à l'écrit. De plus, l'interviewer peut demander à l'élève de préciser son point de vue.

Cependant, on peut compléter les informations sur la compréhension de l'élève obtenues à partir de sa réponse écrite si on regarde la totalité du devoir et les cohérences dans les raisonnements. Ainsi Lucy qui a répondu correctement à toutes les questions sauf la description du mouvement de la voiture verte donne quasiment tout le temps lors de l'entretien des explications claires et correctes. Par exemple dans le cas de la question b de l'exercice 2, voici sa réponse écrite et son commentaire oral :

La vitesse de la caisse A augmente.

La vitesse de la caisse B est constante.

« la B là j'ai marqué que sa vitesse elle était constante parce que entre chaque position entre la une et la deux la deux et la trois c'est euh la même distance donc elle a une vitesse qui change pas elle a toujours la même vitesse » « la A j'ai marqué que sa vitesse augmente parce que ouais pour euh pour euh un un même temps en fait elle p- elle parcourt une euh une distance plus longue donc sa vitesse elle augmente » « j'ai bien regardé euh la la distance entre les deux points que j'ai vu que j'ai tout de suite vu qu'elle était plus grande par rapport au début donc j'ai vu qu'elle euh qu'elle augmentait »

Au contraire, Arthur, qui a donné la même réponse à cette question mais qui a fait beaucoup d'erreurs dans son test, donne une explication beaucoup moins claire. Non seulement, du point de vue de la construction du discours, ses phrases contiennent beaucoup de répétitions et il effectue de nombreux retours en arrière mais il emploie aussi des termes qui ne sont pas ceux de la physique :

« (...) ben comme j'ai dit comme dans la caisse A la vitesse et ben elle est elle augmente et euh pour la caisse B et ben elle est constante parce que parce que en fait euh le pour la caisse A euh la vitesse elle est pas le même dans le dans le même intervalle de temps en fait la vitesse elle comment je pourrais dire elle est irrégulière voilà et pour la caisse B et ben elle est régulière dans dans le même intervalle de temps »

On voit qu'ici Arthur emploie l'adjectif « régulière » pour caractériser la vitesse alors que

les termes utilisés dans le modèle sont « constante » ou « uniforme ».

On peut donc conclure que, même si la réponse écrite n'est pas aussi précise que la réponse orale, le fait de prendre en compte la totalité du devoir nous donne des informations supplémentaires sur le degré de maîtrise des concepts (informations confirmées par l'entretien).

1.2.3. Interprétation de la cohérence entre les réponses écrites

L'analyse des réponses écrites donne accès à la cohérence des questions. Il est important d'analyser le contenu des entretiens pour voir si cette cohérence est consciente chez les élèves. L'exercice du test 1 qui se prête le mieux à l'analyse de la cohérence est l'exercice 3. Nous avons présenté les résultats obtenus à partir de la cohérence des réponses écrites dans le Tableau 11-1. Nous allons ici regarder le comportement des trois élèves interviewés par rapport à cette cohérence.

Anne donne des réponses écrites cohérentes entre elles dans toutes les colonnes. Ses erreurs sont liées à une mauvaise description des mouvements dans certains référentiels. La cohérence est parfois explicitée, par exemple pour la colonne 4 : « *vu que je pense que c'est une ligne droite et que le mouvement il est enfin la vitesse elle est constante ben je dirais rectiligne uniforme* ». Ici la « visualisation » du mouvement est incorrecte puisque l'enfant est immobile par rapport à un autre enfant sur le manège mais la cohérence entre les trois lignes est bonne.

Au contraire, les réponses écrites d'Arthur montrent une incohérence entre la trajectoire et le mouvement pour les colonnes 1 et 4 (Arthur a toujours écrit que la trajectoire était un cercle). Pendant l'entretien, il remet en cause ses réponses (correctes pour certaines) sans jamais faire explicitement référence à un souci de cohérence, qui aurait pourtant pu être un critère de vérification.

Lucy a répondu correctement, et par conséquent de manière cohérente, à toutes les questions. Elle explicite pendant l'entretien la cohérence entre les réponses : « *vu que c'est un cercle* » « *vu que ce sa vitesse elle est constante elle reste toujours la même donc c'est uniforme aussi* ».

Le critère de cohérence est parfois explicitement utilisé par les élèves et est alors un moyen de vérification des réponses. Il manifeste une bonne compréhension des éléments du modèle. Il est donc important que l'enseignant évalue cette cohérence au cas où la réponse ne serait pas correcte, voire qu'il en tienne compte dans sa notation.

1.2.4. Limite de l'unicité de la réponse écrite

Une différence entre l'écrit et l'oral est que la réponse écrite est le résultat d'un choix, qu'elle est unique dans ce qu'elle donne à voir au lecteur. Cela est conforté par les « règles » de l'évaluation qui font que l'élève doit donner une seule réponse. L'oral est au contraire une modalité où le locuteur peut proposer différentes versions de la même idée. Il est donc intéressant d'analyser les entretiens pour comprendre le choix de l'élève lors de l'écriture de sa réponse.

Pendant l'entretien, Anne donne plusieurs explications pour la réponse aux questions

(b) et (c) de l'exercice 1. Ces explications cohérentes du point de vue de la physique correspondent à différentes catégories de justifications (réponses écrites à la question (c)). Voici les trois propositions, émises respectivement dans cet ordre, faites par Anne :

- 1 : les voitures partent en même temps et une des deux voitures va plus loin ;
- 2 : pendant le même intervalle de temps, une voiture va plus loin ;
- 3 : si elles avaient la même vitesse, elles se rencontreraient à 1m50.

Il est donc vraisemblable qu'au moment où elle a répondu à la question par écrit, Anne avait à sa disposition plusieurs explications possibles et a fait ensuite un choix.

C'est la voiture violette qui a la plus grande vitesse car si elle avait eu la même vitesse elles se seraient rencontrées à 1m50 de plus la rencontre a lieu à 1m ~~de la ve~~ du départ de la voiture verte et à 2 m du départ de la voiture violette donc la voiture violette a été plus rapide.

Anne a donc choisi de donner la réponse 3 qu'elle a un peu complétée. Sa réponse écrite ne reprend pas le fait que les deux voitures sont parties en même temps et qu'elles se sont déplacées pendant le même intervalle de temps.

Tout comme Anne, Lucy cumule les explications dans le cas de l'exercice 1 : même départ, distance plus grande puis même départ et même arrêt donc même intervalle de temps et distance plus longue.

Cela illustre le fait que certaines explications écrites incomplètes peuvent être émises par un élève qui a en tête plusieurs explications dont une plus complète. Le problème soulevé ici est le manque d'expertise de l'élève à sélectionner la meilleure explication, en lien avec ses connaissances en mécanique, au moment du passage à l'écriture, du passage de son travail privé à l'élaboration de la trace publique.

1.3. Analyse d'une difficulté détectée dans les réponses écrites

L'analyse des réponses écrites des élèves au premier exercice avait fait apparaître une difficulté que nous n'avions pas prévue : la description du mouvement d'une des deux voitures pour la question présentée page suivante.

Comment caractériseriez-vous le mouvement de chacune des voitures dans le référentiel terrestre sur l'ensemble du parcours ?

Cocher la case lorsque vous pensez que la proposition est correcte.

	voiture verte	voiture violette
Elle a un mouvement rectiligne uniforme.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elle a un mouvement rectiligne non uniforme.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

51% des élèves ont répondu que la voiture verte avait un mouvement rectiligne non uniforme et 78% des élèves ont répondu que la voiture violette avait un mouvement rectiligne uniforme.

Nous formulons ici des hypothèses pouvant expliquer l'origine de ces erreurs, en

utilisant les résultats obtenus à partir de l'analyse des réponses écrites et les informations que les entretiens apportent.

Première hypothèse : l'énoncé incite les élèves à cocher deux cases différentes

La façon dont la question est posée peut inciter les élèves à penser que sur chaque ligne, ils doivent cocher une case. Nous n'avons pas les moyens de rejeter totalement cette hypothèse. Celle-ci est probablement la source d'erreur chez certains élèves. Cependant, aucun des élèves interviewés n'a évoqué cette raison. De plus, les réponses des élèves sont réparties ainsi :

		réponse pour le mouvement de la voiture violette			Total
		les 2 cases sont cochées	rectiligne non uniforme	rectiligne uniforme	
réponse pour le mouvement de la voiture verte	pas de réponse	1	0	0	1
	rectiligne non uniforme	0	43	5	48
	rectiligne uniforme	0	10	15	25
Total		1	53	20	74

Tableau 11-3. Tableau croisé exercice 1 question a mouvement de la voiture verte *
exercice 1 question a mouvement de la voiture violette.

Nous cherchons à voir si les 45 élèves sur 94 qui ont indiqué que la voiture verte avait un mouvement rectiligne uniforme l'ont fait à cause de l'énoncé.

Le Tableau 11-3 montre que 58 élèves (43+15) ont répondu que les deux voitures avaient le même mouvement et 35 élèves (30+5) ont répondu que les voitures avaient un mouvement différent. Il y a donc plus d'élèves qui ont donné le même mouvement que des mouvements différents.

Sur les 45 qui ont répondu que la voiture verte avait un mouvement rectiligne uniforme, 15 élèves ne l'ont pas fait à cause d'une interprétation de l'énoncé puisqu'ils ont répondu que la voiture violette avait aussi un mouvement rectiligne uniforme.

On peut aussi penser qu'une simple interprétation de l'énoncé aurait dû conduire à une meilleure symétrie des réponses. Sur les 35 élèves qui ont indiqué deux mouvements différents, seulement 5 élèves ont répondu que la voiture verte avait un mouvement non uniforme alors que 30 élèves ont indiqué que c'était la voiture violette qui avait un mouvement rectiligne non uniforme. Cependant, si l'élève part du principe qu'il doit cocher une case différente pour chaque voiture, on peut comprendre qu'il choisisse plus facilement le mouvement non uniforme pour la voiture violette puisque celle-ci a dû accélérer pour gagner la course. On trouve une information qui va dans ce sens dans l'entretien avec Lucy (qui a indiqué que la voiture verte avait un mouvement rectiligne uniforme et la voiture violette un mouvement rectiligne non uniforme) :

« ah oui parce que j'ai pensé vu qu'elles partent au même moment donc euh la voiture violette elle a dû accélérer d'un coup donc euh c'est pour ça que j'ai mis qu'elle était non uniforme »

Deuxième hypothèse : une mauvaise connaissance de la signification de « uniforme » en termes de vitesse

Une deuxième hypothèse serait que les élèves ne savent pas qu'uniforme signifie que la vitesse ne varie pas au cours du temps.

Dans l'exercice 2, les questions portant sur la description du mouvement sont réussies de manière quasi-unanime (96-97% des élèves répondent correctement). Le fait que la question sur la variation de vitesse ait été posée précédemment nous permet de dire que tous les élèves (sauf 1) répondent de manière cohérente aux questions 2 et 3 : tous les élèves ayant répondu que la vitesse de la caisse A était constante ont répondu que la caisse A avait un mouvement uniforme ; tous les élèves ayant répondu que la vitesse de la caisse B augmentait ou diminuait ont répondu que la caisse B avait un mouvement non uniforme.

Lors de l'analyse de l'entretien avec Arthur, on voit qu'il justifie ainsi (oralement) sa réponse à la question 1 de l'exercice 1 :

« alors la voiture verte pour euh j'ai mis mouvement rectiligne uniforme parce qu'en fait euh elle se déplace à vitesse constante en en ligne droite » « euh par rapport à la voiture violette j'ai mis qu'elle était rectiligne non uniforme parce que elle se déplaçait sur un mouvement sur une ligne droite mais pas à vitesse constante en fait parce que y a un plus gros y a une plus grosse distance par rapport à la vitesse où elle va en fait »

Le lien entre uniforme, non uniforme et variation de vitesse est donc bien établi et n'est pas la cause de l'erreur pour Arthur. Il semble que les élèves connaissent la signification de « uniforme » en termes de vitesse mais que la difficulté se situe plutôt dans la description de la variation de la vitesse.

Troisième hypothèse : la difficulté de passer de la situation matérielle à la description du mouvement

Nous distinguons ici deux sources d'erreurs : la difficulté de considérer la totalité du trajet et la confusion entre vitesse instantanée et vitesse moyenne.

DIFFICULTÉ DE CONSIDÉRER LA TOTALITÉ DU TRAJET DES VOITURES

Si on reprend les explications orales de Lucy (« ah oui parce que j'ai pensé vu qu'elles partent au même moment donc euh la voiture violette elle a dû accélérer d'un coup donc euh c'est pour ça que j'ai mis qu'elle était non uniforme »), on peut penser que cette élève n'a pas pris en compte la totalité du trajet mais plutôt la partie centrale (entre le moment où la voiture a démarré et le moment où elle commence à freiner pour s'arrêter). Ceci pourrait expliquer le fait que c'est plus souvent la voiture violette que la voiture verte qui a un mouvement non uniforme. Cette hypothèse met en avant le fait que les élèves utilisent une information liée à la vitesse (la voiture violette va plus vite) mais non pertinente pour décider de l'uniformité ou de la non-uniformité du mouvement de la voiture.

Anne a répondu que les deux voitures avaient un mouvement rectiligne uniforme. La

première explication qu'Anne donne (« comme euh c'est sur un rail qui est en ligne droite c'est c'est enfin déjà c'est rectiligne et euh comme les voitures vont pas à la même vitesse c'est uniforme ») semble montrer qu'Anne ne tient pas compte de la totalité du trajet. En effet, puisqu'elle considère que les deux voitures ont une vitesse constante mais que l'une va plus vite que l'autre, c'est qu'elle imagine ces voitures une fois lancées. Cette représentation de la situation peut donc aussi expliquer les réponses des élèves qui ont indiqué que les deux voitures avaient un mouvement rectiligne uniforme. Cependant, il est plus difficile de comprendre pourquoi ces élèves considèrent que le mouvement est uniforme.

DIFFICULTÉ DE PRENDRE CONSCIENCE QUE VITESSE DÉSIGNE ICI VITESSE INSTANTANÉE ET NON PAS VITESSE MOYENNE

L'argument avancé par Lucy revient à regarder une information liée à la vitesse moyenne (la voiture violette va plus vite) alors que le caractère uniforme du mouvement est lié à la vitesse instantanée. Or, la situation (course) incite les élèves à comparer les vitesses moyennes des deux voitures (principe d'une course). Ceci est exprimé clairement par Lucy dans son entretien : « *déjà j'ai vu que pour euh pour une même distance sachant qu'elles sont parties au même moment que la voiture violette elle avait fait plus de trajet que la voiture verte* » « *j'ai déjà tout de suite su qu'elle était plus rapide* ». La situation de course l'a fait rentrer d'emblée dans la considération de la vitesse moyenne, ce qui rend peut-être l'analyse en termes de vitesse instantanée plus délicate.

De même, dans son explication orale, Arthur parle de la distance totale qui intervient dans le calcul de la vitesse moyenne (« euh par rapport à la voiture violette j'ai mis qu'elle était rectiligne non uniforme parce que elle se déplaçait sur un mouvement sur une ligne droite mais pas à vitesse constante en fait parce que y a un plus gros y a une plus grosse distance par rapport à la vitesse où elle va en fait »).

On peut penser que, pour Anne et les autres élèves qui ont répondu que les voitures avaient toutes les deux un mouvement rectiligne, c'est le fait que la vitesse moyenne soit une constante (valable pour la totalité du trajet) qui les pousse à donner cette réponse.

Conclusion

Il semble donc que notre question mette bien en avant la difficulté des élèves à décrire le mouvement c'est-à-dire à passer d'une description en termes d'objets et d'événements d'une situation matérielle à la description de cette situation avec les termes du modèle. L'analyse des réponses écrites et des entretiens nous a permis de rejeter les hypothèses que les erreurs des élèves proviendraient de la formulation de l'énoncé ou d'une non-connaissance des termes employés. Cette difficulté semble être liée aux propriétés de la situation proposée : la situation de course de voiture incite l'élève à comparer les vitesses moyennes des voitures et non à regarder indépendamment la variation de la vitesse instantanée dans le temps. De plus, le démarrage et l'arrêt de la voiture ne semblent pas être pris en compte dans l'analyse de la situation proposée.

1.4. Conclusion de la validation du test 1

Le test 1 peut être considéré comme un bon outil d'évaluation des connaissances des élèves sur le mouvement. En effet, l'analyse des entretiens, et en particulier la comparaison entre les réponses écrites des élèves et leurs réponses orales au moment de l'entretien, nous a permis de confirmer les résultats obtenus par l'analyse des réponses écrites pour les élèves interviewés. On a vu que dans certains cas les réponses orales des élèves différaient légèrement de leurs réponses écrites mais il s'agissait plus souvent d'une instabilité dans le temps que d'une expression écrite qui ne traduisait pas leur compréhension. Nous avons vu un seul exemple où l'interprétation de la réponse écrite laissait penser que l'élève avait compris alors qu'il n'avait pas compris (cas d'Arthur écrivant « Le point choisi est le centre de gravité »). Cette question serait à retravailler et à croiser avec d'autres questions évaluant le choix d'un point représentant un objet pour l'étude du mouvement afin de savoir si cette composante du concept de mouvement est bien maîtrisée par l'élève.

La plupart du temps l'ensemble des réponses écrites permettait de se faire une idée des acquis et des difficultés de chaque élève et de l'ensemble des élèves. On a même vu que l'étude de la cohérence entre les réponses écrites permettait d'avoir une bonne idée du degré de maîtrise de l'élève puisque le discours oral des élèves ayant répondu par écrit de manière correcte et cohérente à l'ensemble des questions était clair, alors que le discours oral des élèves ayant répondu par écrit de manière incohérente était souvent confus. Il y a donc une bonne adéquation entre les réponses écrites des élèves et les réponses orales données lors de l'entretien. On pourrait nuancer cette conclusion par le fait que les élèves avaient à leur disposition leur réponse écrite. Cependant, le but n'était pas de voir la stabilité dans le temps de leurs réponses mais bien de s'assurer que ce qu'on pourrait inférer sur leur compréhension à partir de leur réponse écrite était conforme à ce qu'ils avaient voulu dire.

On peut donc considérer que les enseignants peuvent utiliser ce test pour recueillir des informations qui leur donneront un bon indicateur de la compréhension de leurs élèves sur le concept de mouvement.

2. Test 2

Comme nous l'avons indiqué, après avoir illustré chacun des traitements pour le test 1, nous adoptons une présentation thématique pour les autres tests. Nous abordons donc pour le test 2 les principales composantes du concept de force évaluées. Les résultats obtenus à partir de l'analyse des réponses écrites nous permettent d'avoir des informations sur la compréhension des élèves. Nous les validons au fur et à mesure par les informations issues de l'analyse des entretiens.

2.1. Identification des interactions et des forces

Comme nous l'avons vu dans l'analyse du savoir (partie « Production des tests », p.88), les forces sont enseignées par le biais des interactions. Il est donc intéressant de regarder si les élèves sont capables d'identifier les interactions, les forces et de faire le lien entre les deux. Il est notamment important de regarder si l'idée de force « motrice » (mise en

évidence dans les travaux sur les conceptions) persiste avec ce type d'enseignement. L'étude des caractéristiques données aux forces dans le schéma des forces permet d'étudier le sens que donnent les élèves à la force, afin de voir s'ils passent par les caractéristiques de l'action ou celles du mouvement.

2.1.1. Identification des interactions

Dans le test 2, deux exercices mettaient en jeu des questions où on demandait aux élèves d'identifier les interactions sous différents registres sémiotiques : liste des interactions en langue naturelle ou diagrammes système interaction (p.101).

Nous regardons dans un premier temps les réponses écrites des élèves à l'exercice 1 (on demande aux élèves de compléter le tableau pour décrire les interactions dans le cas d'une fléchette lancée vers une cible, p.101).

Tableau 11-4. Fréquences (et pourcentages correspondants) des réponses des élèves à l'exercice 1 du test 2 (la réponse correcte attendue est indiquée en gras).

	Interaction de contact	Interaction à distance	Pas d'interaction
fléchette / joueur	5 (6%)	21 (23%)	65 (71%)
fléchette / cible	3 (3%)	15 (17%)	73 (80%)
cible / Terre	2 (2%)	87 (96%)	2 (2%)
fléchette / Terre	0	88 (97%)	3 (3%)
joueur / sol	90 (99%)	1 (1%)	0
joueur / Terre	4 (4%)	87 (96%)	0
fléchette / air	88 (97%)	2 (2%)	1 (1%)
fléchette / sol	0	15 (17%)	76 (83%)

On voit que dans le cas de deux systèmes en contact (joueur / sol), le taux de réussite est quasi-parfait (99%). Dans le cas de deux systèmes qui ne sont pas en contact (et dont aucun n'est la Terre), le taux de réussite varie entre 71% et 83% (fléchette / joueur, fléchette / cible et fléchette / sol). La majorité des élèves n'ayant pas réussi ces questions ont indiqué une interaction à distance. Dans le cas du couple fléchette / joueur, la raison de cette interaction peut être contenue dans l'idée de force motrice. Cependant, cela n'explique pas les réponses des élèves ayant indiqué une interaction à distance pour les deux autres couples. Une hypothèse est que les élèves considèrent qu'il y a toujours interaction et qu'ils appliquent la règle suivante : si les objets se touchent alors il y a interaction de contact, si les objets ne se touchent pas alors il y a interaction à distance. On peut pour vérifier cela faire des croisements pour voir si ce sont les mêmes élèves qui ont coché ces cases (cf. Tableau 11-5).

Tableau 11-5. Croisement des réponses des élèves pour les couples fléchette / joueur, fléchette / cible et fléchette / sol.

fléchette / sol	fléchette / joueur	
-----------------	--------------------	--

		fléchette / cible			Total
		interaction de contact	interaction à distance	pas d'interaction	
interaction à distance	interaction de contact	0	1	1	2
	interaction à distance	0	<u>3</u>	3	6
	pas d'interaction	0	0	7	7
	Total	0	4	11	15
pas d'interaction	interaction de contact	2	0	1	3
	interaction à distance	0	8	7	15
	pas d'interaction	2	3	54	58
	Total	3	11	62	76

On voit dans ce tableau que 54 élèves donnent systématiquement la bonne réponse. Seulement trois élèves indiquent systématiquement une interaction à distance pour les trois couples. On peut donc rejeter l'hypothèse proposée ci-dessus.

Si on s'intéresse maintenant aux interactions avec le système Terre, les performances des élèves mettent en avant le fait que l'interaction des objets avec la Terre ne pose pas trop de difficultés aux élèves (taux de réussite de 96%). La confusion semble se faire parfois entre la Terre et le sol (pour les élèves qui indiquent « interaction de contact » dans le cas du joueur). Pour les élèves ayant indiqué qu'il n'y a pas d'interaction entre la fléchette et la Terre, on peut supposer qu'ils font fonctionner une règle du type « un objet dans les airs n'est pas en interaction avec la Terre » ou qu'ils confondent Terre et sol.

On peut essayer de regarder les réponses des élèves sur l'interaction à distance avec la Terre dans l'exercice 4. On voit que pour cet exercice 78 élèves sur 91 ont systématiquement indiqué l'interaction avec la Terre (sur 9 questions). Il n'y a pas d'erreurs communes à un grand nombre d'élèves (les 13 élèves restant ont fait différents types d'erreurs). On a par exemple deux élèves qui ont indiqué une interaction de contact avec la Terre pour tous les objets posés sur le sol (le joueur dans l'exercice 1, le joueur et le ballon dans la première situation de l'exercice 4, le joueur dans la deuxième situation de l'exercice 4). Même si ce résultat ne concerne pas un grand nombre d'élèves, il montre qu'on peut supposer pour ces deux élèves qu'ils vont systématiquement appliquer la règle « interaction de contact avec la Terre pour les objets en contact avec le sol » et qu'on peut alors mieux rétroagir sur leur apprentissage. Un de ces deux élèves n'a jamais indiqué l'interaction avec le sol dans l'exercice 4. Il s'agit donc probablement d'une véritable confusion entre Terre et le sol.

Nous venons donc de voir que l'analyse des réponses écrites des élèves nous permet de dire que les élèves n'ont pas trop de difficulté à identifier les interactions de contact ni les interactions à distance avec la Terre. La difficulté semble résider dans les cas où il n'y a pas d'interaction. Cette analyse nous a permis aussi de faire une hypothèse sur les difficultés qui pouvaient persister chez certains élèves dans l'identification de l'interaction à distance avec la Terre. Pour avoir plus d'information sur cette difficulté, nous pouvons utiliser les entretiens. Parmi les trois élèves interviewés (Charlotte, Roland et Aurélie), seule Charlotte a fait des erreurs de ce type.

Voici les réponses écrites de Charlotte :

Tableau 11-6. Réponse écrite de Charlotte à l'exercice 1 du test 2.

	Interaction de contact	Interaction à distance	Pas d'interaction
fléchette / joueur	X		
fléchette / cible	X		
cible / Terre		X	
fléchette / Terre			X
joueur / sol	X		
joueur / Terre		X	
fléchette / air		X	
fléchette / sol			X

On voit que dans le Tableau 11-6 que Charlotte n'a pas indiqué d'interaction avec la Terre dans le cas de la fléchette. On voit dans certaines de ces interventions qu'elle utilise probablement la logique suivante : la Terre est en interaction avec la cible par l'intermédiaire (d'où « à distance ») du sol et du mur et en interaction avec le joueur par l'intermédiaire du sol. Il n'y a donc pas d'interaction entre la Terre et la fléchette puisqu'il n'y a pas d'intermédiaire. Cela revient à considérer que les objets dans les airs ne sont pas en interaction avec la Terre. On voit dans l'ensemble de l'entretien que cette élève semble connaître la règle « enseignée » qui consiste à toujours mettre une interaction à distance avec la Terre :

« je sais que la Terre elle était presque à chaque fois à chaque exercice » (tdp 31)

Cependant, elle doute parfois et notamment dans les cas où l'objet est dans les airs. Lors de l'explicitation de sa réponse à l'exercice 2, dans le cas où on lui demande de représenter les forces qui s'exercent sur la balle en train de monter, Charlotte (qui ne regarde pas sa réponse où elle a indiqué la force exercée par la Terre) doute :

« ouais la Terre en fait je sais pas si on faut la remettre »

Tout au long de l'entretien, Charlotte semble se contredire sur ce qu'elle appelle interaction à distance. Dans la situation de l'interaction homme-Terre (exercice 4 situation 1) elle va indiquer une interaction à distance en justifiant ainsi :

« le joueur il est sur terre »

Au contraire dans le cas de l'interaction ballon-Terre (exercice 4 situation 2 – le ballon est dans les airs), elle a là aussi indiqué une interaction à distance et justifie ainsi :

« donc y a interaction à distance pour la Terre vu que le ballon il est pas directement sur la Terre »

Cette élève n'est donc pas cohérente dans son raisonnement, elle semble utiliser différents modèles selon les situations. Cela peut expliquer pourquoi la recherche des cohérences dans les réponses écrites ne permet pas toujours de comprendre le fonctionnement de l'élève. Cependant, dans le cas de Charlotte, la détection d'une erreur dans le test indique bien que l'élève n'a pas compris qu'on considère

toujours une interaction à distance entre la Terre et les objets à proximité de sa surface. On peut supposer que dans le cas d'une règle enseignée qui s'applique quelle que soit la situation, une erreur dans le test permet de montrer que l'élève n'applique pas la règle. On voit cependant que les réponses écrites ne sont pas toujours suffisantes pour comprendre le fonctionnement alternatif de l'élève. L'entretien est alors une source d'informations complémentaires.

2.1.2. Lien Interaction-Forces

Dans le test 2, l'exercice 4 est le seul exercice où on pose des questions aux élèves à la fois sur les interactions et sur les forces pour les mêmes situations. L'analyse de cet exercice nous permet de voir le lien que l'élève fait entre les interactions et les forces. Rappelons que le modèle enseigné dit que s'il y a une interaction entre les systèmes A et B alors le système A exerce une force sur le système B et le système B exerce une force sur le système A. Les interactions ont été introduites dans l'enseignement comme un outil pour déterminer les forces.

Nous avons analysé les réponses écrites à l'exercice 4 pour voir la correspondance entre les interactions indiquées et non indiquées par l'élève (sans distinguer si ces interactions sont notées de contact ou à distance) et les forces indiquées et non indiquées par l'élève. Dans l'exercice 4, on s'intéresse successivement au système joueur puis au système ballon. Le Tableau 11-7 indique les interactions et les forces pour le joueur et le Tableau 11-8 indique les interactions et les forces pour le ballon.

Tableau 11-7. Analyse des réponses des élèves dans l'exercice 4 du test 2 (uniquement interactions avec le joueur et forces exercées sur le joueur).

		Situation 1		Situation 2		Situation 3	
	JOUEUR	force	pas de force	force	pas de force	force	pas de force
Terre	interaction	90		89		89	1
	pas d'interaction						
Sol	interaction	71	5	75	2	15	1
	pas d'interaction		14		12		74
Air	interaction	23		18		68	1
	pas d'interaction	3	64	1	70	1	20
Ballon	Tableau 11-8. Analyse des réponses des élèves dans l'exercice 4 du test 2 (uniquement interactions avec le ballon et forces exercées sur ballon).						
	interaction	83	6	11	2	85	1
	pas d'interaction	1			76		4

Tableau 11-8. Analyse des réponses des élèves dans l'exercice 4 du test 2 (uniquement interactions avec le ballon et forces exercées sur ballon).

**Evaluer la compréhension des concepts de mécanique chez des élèves de seconde :
Développement d'outils pour les enseignants**

		Situation 1		Situation 2		Situation 3	
	BALLON	force	pas de force	force	pas de force	force	pas de force
Terre	interaction	88	<i>1</i>	88	<i>2</i>	87	<i>3</i>
	pas d'interaction		<i>1</i>				
Sol	interaction	34	<i>2</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>8</i>	
	pas d'interaction	<i>1</i>	53	<i>1</i>	82		82
Air	interaction	<i>28</i>		89		<i>39</i>	<i>2</i>
	pas d'interaction	<i>1</i>	<i>61</i>	<i>1</i>		<i>1</i>	<i>48</i>
Joueur	interaction	89		<i>9</i>	<i>3</i>	89	
	pas d'interaction		<i>1</i>	<i>2</i>	76		<i>1</i>

On a indiqué dans ces deux tableaux les effectifs correspondants aux élèves ayant donné des réponses incohérentes en italiques. 83 à 90 élèves (en fonction des situations) indiquent de manière cohérente les interactions et les forces :

- s'il y a une interaction, il y a une force ;
- s'il n'y a pas d'interaction, il n'y a pas de force.

Les situations qui posent le plus de difficultés sont l'interaction sol/joueur dans la situation 1 (5 erreurs : interaction mais pas de force), l'interaction ballon/joueur dans la situation 1 (7 erreurs dont 6 : interaction mais pas de force) et l'interaction joueur/ballon dans la situation 2 (5 erreurs dont 3 : interaction mais pas de force). Pour ces élèves, on peut donc penser qu'ils n'utilisent pas le diagramme système interaction comme un outil pour déterminer les forces.

Afin de vérifier si les élèves qui ont indiqué des réponses cohérentes entre les interactions et les forces ont bien acquis qu'à chaque interaction correspond une force, on peut regarder si ces élèves l'ont fait de manière systématique (sur les 24 fois où ils avaient à le faire).

Le Tableau 11-9 présente les résultats que nous avons obtenus par croisement.

Tableau 11-9. Cohérence des réponses des élèves sur l'ensemble des questions de l'exercice 4 du test 2 (lien entre Interactions et Forces)

Nombre de fois où les élèves ont répondu de manière cohérente (sur 24)	Fréquence	Pourcentage
14 19 21 22 23 24	1 1 2 5 9 72	1,1% 1,1% 2,2% 5,6% 10,0% 80,0%
Total	90	100,0%

On voit dans le Tableau 11-9 que 80% des élèves ont donné systématiquement des interactions et des forces cohérentes (24 fois sur 24). On peut donc dire que ces élèves ont acquis qu'à chaque interaction correspond une force.

Afin de vérifier que l'étude de cette cohérence permet de voir si l'élève fait le lien entre interactions et forces, on peut aussi analyser les entretiens.

Aurélie et Charlotte ont toujours indiqué les forces correspondant aux interactions.

Charlotte précise qu'elle a utilisé la première colonne pour faire la deuxième :

« je l'ai fait euh en en ligne » « j'ai j'ai regardé mon mon diagramme et j'ai les force- les forces exercées donc ben la force exercée par le ballon sur le joueur et la force exercée de la Terre sur le joueur »

Roland n'a pas indiqué toutes les forces correspondant aux interactions et a indiqué les forces réciproques. Par exemple, pour la situation 1 :

Système étudié	diagramme système interaction	Liste des forces qui s'exercent sur le système
joueur		$\overline{F_{\text{JOUEUR/TERRE}}}$ $\overline{F_{\text{TERRE/JOUEUR}}}$
ballon		$\overline{F_{\text{AIR/BALLON}}}$ $\overline{F_{\text{BALLON/AIR}}}$ $\overline{F_{\text{TERRE/BALLON}}}$ $\overline{F_{\text{BALLON/TERRE}}}$

Tableau 11-10. Réponse de Roland à la première situation de l'exercice 4 (le joueur tire dans le ballon).

Pendant l'entretien, Roland a expliqué qu'il avait répondu en colonne :

« euh par colonne j'ai fait » « j'ai d'abord fait comme ça comme ça et comme ça et ensuite j'ai repris les forces »

Cette stratégie est révélatrice du fait que Roland n'a pas fait le lien direct entre les deux colonnes.

On peut donc en conclure que si les réponses écrites sont cohérentes alors l'élève utilise probablement le diagramme ou les règles sous-jacentes au diagramme pour faire la liste des forces.

2.1.3. Idée de force motrice

Il est important de regarder si les élèves ont identifié correctement (du point de vue de la physique enseignée) les forces et les interactions et par conséquent de vérifier qu'ils n'ont pas indiqué les forces et interactions qui ne figurent pas dans la réponse correcte (toujours du point de vue de la physique enseignée). Parmi les forces et interactions qui ne devraient pas être citées par l'élève, nous nous sommes intéressés aux forces prévues d'après les travaux sur les conceptions par exemple mais incorrectes du point de vue de la physique, et plus particulièrement aux forces correspondant à ce que nous avons

appelé la « force motrice ».

Tableau 11-11. Analyse de la cohérence des réponses des élèves sur les questions pouvant faire intervenir l'idée de force motrice (En gras : nombre d'élèves cohérents avec la physique enseignée sur les 3 réponses, souligné : nombre d'élèves cohérents avec l'idée de force motrice sur les 3 réponses, *en italique* : nombre d'élèves ayant un « modèle » mixte selon les questions)

exercice 2 force exercée par le lanceur	exercice 1 interaction fléchette/joueur	exercice 4 situation 2 force exercée par le joueur sur le ballon	
		pas de force	force citée
pas de force	contact	3	<i>1</i>
	distance	13	3
	pas d'interaction	54	<i>1</i>
force vers le haut	contact	1	0
	distance	3	<u>1</u>
	pas d'interaction	6	3

Cette analyse des réponses écrites nous permet de voir que, sur les 34 élèves qui citent au moins une fois une force pouvant être interprétée comme force motrice, seul 1 élève indique systématiquement cette force. 54 élèves n'ont jamais indiqué une force exercée à distance par l'agent responsable de la mise en mouvement (mais peuvent penser qu'il est nécessaire d'avoir une force dans le sens du mouvement).

Lorsqu'on regarde les entretiens, on voit qu'une des élèves interviewés (Charlotte) indique parfois une interaction avec le « lanceur ». Il lui arrive d'indiquer la force exercée par le lanceur une fois l'objet lancé (force exercée par le joueur sur le ballon dans les airs dans l'exercice 4) mais pas systématiquement (pas de force indiquée dans le schéma des forces qui s'exercent sur la balle qui monte dans les airs).

On se rend compte que cette élève semble utiliser différents modèles pour déterminer s'il y a ou non force ou interaction :

- modèle enseigné : s'il n'y a pas de contact entre deux systèmes alors ces systèmes ne sont pas en interaction (sauf si l'un des deux systèmes est la Terre ou qu'il y a interaction magnétique entre ces deux systèmes) ;
- modèle « action par l'intermédiaire d'un objet » : si un système 1 est en contact avec un système 2 et que ce système 2 est en contact avec un système 3 alors le système 1 peut être en interaction avec le système 3 (et exercer une force sur lui) par l'intermédiaire du système 2 ;
- modèle qui prend en compte le passé et l'avenir de l'objet : si le joueur a lancé une fléchette, il est en interaction avec cette fléchette ; si la fléchette se dirige vers la cible, elle est en interaction avec cette cible ;
- modèle qui nécessite une force dans le sens du mouvement.

Il ne s'agit donc pas toujours de l'idée de force motrice au sens où nous l'avons présentée (cf. Partie théorique, chapitre 2) mais il s'agit plutôt d'un fonctionnement où coexistent différents modèles (incorrects pour la plupart) utilisés selon la situation.

2.1.4. Schéma des forces : identification et caractéristique des forces

Nous avons indiqué l'importance des registres sémiotiques. Jusqu'à présent, notre analyse de la compréhension par les élèves du concept de force s'est limitée à l'analyse des questions mettant en jeu l'identification des forces soit en langue naturelle soit éventuellement sous forme vectorielle. L'expression schématique de la force présente non seulement l'information sur l'identification des forces mais aussi les caractéristiques qui lui sont attribuées (direction et sens sont les caractéristiques qui nous intéressent ici).

Dans le test 4, on demandait aux élèves dans l'exercice 2 de représenter le schéma des forces s'exerçant sur une balle en train d'être lancée à la verticale puis sur la balle en train de monter.

Le Tableau 11-12 et le Tableau 11-13 présentent les fréquences des réponses des élèves à cet exercice.

Tableau 11-12. Fréquences des réponses des élèves selon les catégories définies pour la situation 1 de l'exercice 2 du test 2 (les forces exercées sur la balle pendant que la personne la lance).

Force exercée par l'air	Force exercée par la Terre	Force exercée par le lanceur		
		pas de force	force vers le haut	force vers le bas
pas de force	force vers le bas	1	14	2
force vers le haut	force vers le bas	1	4	7
force vers le bas	force vers le bas	1	57	
force vers la droite	force vers la gauche	1		

Tableau 11-13. Fréquences des réponses des élèves selon les catégories définies pour la situation 2 de l'exercice 2 du test 2 (les forces exercées sur la balle qui monte dans les airs).

Force exercée par l'air	Force exercée par la Terre	Force exercée par le lanceur		
		pas de force	force vers le haut	force vers le bas
pas de force	pas de force	1		
	force vers le bas		1	
force vers le haut	force vers le haut	2		
	force vers le bas	12		1
force vers le bas	force vers le bas	60	13	

Pour cette analyse, nous avons choisi de ne considérer que les trois forces qui nous intéressent *a priori* : la force exercée par la Terre, la force exercée par l'air et la force exercée par la personne. Les seules autres forces qui ont été mentionnées sont la force exercée par la balle (citée par un élève dans la situation de la balle en train d'être lancée) et la force exercée par le sol sur la balle (citée par trois élèves dans la situation de la balle en train de monter).

Du point de vue de l'identification des forces, on voit que tous les élèves ont

représenté la force exercée par la Terre pour le premier schéma et que tous les élèves sauf un l'ont indiqué dans le deuxième schéma. Plus d'élèves ont indiqué la force exercée par l'air dans le cas où la balle monte dans les airs que dans le cas où elle est lancée. Nous avons remarqué à plusieurs reprises que le critère de prise en compte de cette force variait d'un enseignant à un autre et nous nous intéresserons surtout ici à la caractéristique de cette force lorsqu'elle est indiquée. Enfin quatre élèves n'ont pas indiqué la force exercée par la personne pendant le lancer (alors qu'ils auraient dû) et 15 personnes ont indiqué cette force au moment de la montée (alors qu'il ne fallait pas la représenter). On observe donc des performances qui rejoignent les conclusions issues de l'analyse des interactions : la force exercée par la Terre ne pose pas de difficulté alors que la force exercée par le lanceur est plus délicate.

Nous avons analysé les caractéristiques des forces afin de mieux comprendre le sens que pouvaient donner les élèves à ces forces. On voit ainsi qu'un élève indique une force exercée par la Terre vers la gauche pour le premier schéma et deux élèves représentent cette force vers le haut dans le deuxième schéma. C'est une petite minorité d'élèves mais cet indice est assez important pour laisser penser que l'élève a un problème de compréhension. On note une autre difficulté, présente chez plus d'élèves et difficile à interpréter. Il s'agit du fait que 9 élèves représentent la force exercée par le lanceur vers le bas dans le premier schéma. En effet, l'erreur attendue dans cet exercice était que les élèves indiquent la force exercée par le joueur vers le haut dans le deuxième schéma mais nous n'avions pas prévu que les élèves représentent la force exercée par le lanceur vers le bas pour le premier.

On remarque que 14 élèves n'ont pas indiqué de force exercée par le lanceur mais ont indiqué la force de l'air vers le haut pour le deuxième schéma. Cela va dans le sens de ce que nous avons signalé pour la force motrice. Même si les élèves savent qu'il n'y a pas la force exercée par le joueur (puisque'il n'y a pas contact), ils souhaitent indiquer une force dans le sens du mouvement.

Pendant les entretiens, les élèves évoquent rarement le sens des forces. Charlotte, qui pour le deuxième schéma a indiqué la force exercée par la Terre vers le bas et la force exercée par l'air vers le haut, répond ainsi à nos questions (l'interviewer est noté I et Charlotte est notée C) :

I	<i>et alors qu'est-ce qui te fait mettre euh la Terre comme ça et puis l'air comme ça</i>
C	<i>parce que euh la Terre euh l'air plutôt elle est euh c'est c'est la force euh qui vu qu'elle est en l'air et ben c'est la force la plus importante</i>
I	<i>ouais</i>
C	<i>et si ah si la balle elle aurait été par terre il aurait fait retomber ça aurait été la Terre vu qu'elle est par terre la balle</i>
I	<i>d'accord et alors le fait que l'air elle soit vers le haut parce que est-ce que tu penses que il peut y avoir les deux vers le bas mais avec la force de l'air qui est plus importante</i>
C	<i>euh non parce que la la balle elle monte dans dans l'air</i>
I	<i>ouais</i>
C	<i>elle monte donc euh non c'est pas possible</i>
I	<i>d'accord donc le fait que tu mettes l'air vers le haut c'est parce qu'elle monte</i>
C	<i>ouais</i>

Charlotte semble donner au sens des flèches une signification en termes de mouvement. La force exercée par la Terre est vers le bas car c'est la Terre qui fait retomber la balle. La force exercée par l'air est vers le haut car la balle monte.

Nous avons donc retrouvé dans les performances des élèves des réponses correspondant au raisonnement « lien force et mouvement ». En effet, quand la force est dans le sens du mouvement (situation 1), la caractérisation des forces ne pose pas de problème. Dans le cas où la résultante des forces n'est pas dans le sens du mouvement (cas de la situation 2 où la balle monte dans les airs), les résultats sont plutôt bons puisque nous obtenons environ 60% de bonnes réponses. Cependant, même si peu d'élèves ont indiqué la force exercée par le joueur sur la balle pendant la montée, on voit que cette situation a incité les élèves à indiquer une force vers le haut : dans la plupart des cas, il s'agit de la force exercée par l'air (mais le nombre d'élèves ayant indiqué la force exercée par l'air vers le haut est comparable dans la situation 2 (14) et dans la situation 1 (12)) mais on remarque que deux élèves ont indiqué la force exercée par la Terre vers le haut dans la situation 2 alors que la caractérisation de cette force ne pose normalement pas de problème aux élèves. L'enseignement par le biais des interactions semble avoir été efficace pour lutter contre l'idée de force motrice mais il paraît nécessaire de se méfier que cela ne fasse pas apparaître d'autres types d'erreurs.

2.2. Principe des actions réciproques

Deux exercices du test 2 nécessitaient l'utilisation du principe des actions réciproques. C'est un principe qui pose de réelles difficultés aux élèves.

Tableau 11-14. Fréquences et pourcentages correspondants des réponses des élèves à l'exercice 3 du test 2.

	1 ^{ère} situation : la caisse ne bouge pas	2 ^{ème} situation : la caisse commence à bouger
Il n'y a pas de force exercée par la caisse sur l'homme.	4 (4%)	2 (2%)
La force exercée par la caisse sur l'homme est plus petite que la force exercée par l'homme sur la caisse.	2 (2%)	80 (88%)
La force exercée par la caisse sur l'homme est plus grande que la force exercée par l'homme sur la caisse.	19 (21%)	2 (2%)
La force exercée par la caisse sur l'homme a la même intensité que la force exercée par l'homme sur la caisse.	64 (70%)	7 (8%)

Cette comparaison des réponses des élèves nous permet de voir sans même avoir besoin de faire des croisements que la majorité des élèves qui ont donné la bonne réponse dans la première situation n'ont pas donné la bonne réponse dans la deuxième situation. Afin de comprendre la règle que les élèves utilisent à la place du principe des actions réciproques, on peut regarder les justifications des élèves.

On voit alors que sur les 64 élèves qui ont donné la bonne réponse dans la première situation, 32 ont justifié en disant que les forces avaient même intensité car la caisse (ou l'homme et la caisse) était immobile et 13 ont justifié en disant que si l'une des deux forces était plus grande, alors il y aurait un mouvement (de la caisse ou de l'homme). Seulement 4 élèves ont cité le principe des actions réciproques (dont 2 qui ont rajouté que les objets étaient immobiles).

On peut se demander si les élèves réalisent bien qu'il ne s'agit pas de deux forces qui s'exerceraient sur un même système mais bien une force exercée par le système 1 sur le système 2 et une force exercée par le système 2 sur le système 1. On peut alors regarder les réponses écrites des élèves à l'exercice 5 (cf. énoncé p. 134) où la représentation des deux points indique plus clairement qu'il s'agit de deux systèmes différents.

Tableau 11-15. Résultats de l'analyse des réponses écrites à l'exercice 5 du test 2.

Situation	Résultats
Thibaut pousse Arnaud et le fait reculer	8 élèves ont indiqué deux forces de même intensité (2 ont donné la bonne réponse). 56 élèves ont représenté la force exercée par Thibaut plus grande.
Un aimant attire un clou	8 élèves ont indiqué deux forces de même intensité (5 ont donné la bonne réponse). 55 élèves ont représenté la force exercée par l'aimant plus grande.
Danièle pousse une voiture	5 élèves ont indiqué deux forces de même intensité (1 ont donné la bonne réponse). 51 élèves ont représenté la force exercée par Danièle plus grande.
Jad et Sliman s'attirent et restent immobiles	85 élèves ont indiqué deux forces de même intensité (37 ont donné la bonne réponse).

L'analyse des réponses des élèves aux deux exercices montre que la majorité des élèves semble appliquer le principe suivant : « *C'est l'objet qui fait bouger qui exerce la force la plus grande* » (44% des élèves ont « appliqué » ce principe dans les 4 cas où il y avait un mouvement), et cela même si la représentation indique qu'il s'agit de deux systèmes différents. On note d'ailleurs que, contrairement aux résultats préliminaires de Meltzer (2005), le taux de réussite n'est pas plus bas pour les questions mettant en jeu une représentation schématique des forces. On peut penser que les erreurs des élèves ne proviennent pas du fait qu'ils imaginent que les forces s'appliquent sur le même système.

Lors de l'entretien, Aurélie dit qu'elle pensait au moment de répondre à l'exercice 3 qu'il s'agissait de deux forces exercées sur la caisse mais le fait de réaliser qu'il s'agit de forces exercées par et sur des systèmes différents ne change pas sa réponse :

« vu qu'elle bouge pas et ben ça veut dire les deux forces elles sont égales ouais c'est ça en fait » « ouais en fait j'ai pas parlé du euh en fait c'est quand y a deux forces euh l'une contre l'autre c'est pas deux forces sur un objet » « j'ai fait comme si y avait deux forces qui s'exerçaient sur la caisse » « je mettrais que quand y a deux forces qui (geste) enfin qui s- enfin qui s'opposent enfin quand elles sont ouais qui s'opposent en fait ben si elles sont égales et ben ça bouge pas »

Elle prend soin de reformuler sa réponse mais ne change pas le fond. Cet extrait d'entretien semble confirmer que les erreurs ne sont pas uniquement liées à cette difficulté.

Il semble raisonnable de dire que la majorité des élèves applique la règle « C'est l'objet qui fait bouger qui exerce la force la plus grande ».

2.3. Bilan : connaissances des élèves après l'enseignement de la partie 2

Le test 2 permet d'évaluer la partie « Interactions et Forces » de la séquence de mécanique. Nous avons distingué dans notre analyse deux grandes parties : l'identification des interactions et des forces et l'utilisation du principe des actions réciproques.

Le Tableau 11-16 présente les différents taux de réussite « croisés » pour l'identification des interactions et des forces. On a distingué les différents types d'interaction (interaction à distance avec la Terre, interaction de contact, pas d'interaction) et les forces associées. Les colonnes sont présentées par couple interactions/forces en commençant par les points les mieux réussis.

Tableau 11-16. Bilan des taux de réussite des élèves aux questions portant sur l'identification des interactions et des forces.

Identification	Interactions avec la Terre	Forces exercées par la Terre	Interactions avec un objet en contact	Forces exercées par un objet en contact	Interactions avec un objet « pas en contact »	Forces exercées par un objet « pas en contact »
Nombre de questions évaluant ce point	9	8	6	6	7	5
Taux de réussite sur l'ensemble des questions	86/91	78/91	71/91	56/91	49/91	61/91

A la fin de la partie 2 de l'enseignement (Interactions et Forces), il semble donc que les élèves savent bien identifier les forces et les interactions avec la Terre, assez bien avec un objet en contact et moyennement avec un objet qui n'est pas en contact (et pour lequel ils ne devraient pas indiquer de force ou d'interaction).

Le principe des actions réciproques n'est, par contre, acquis par quasiment aucun élève. La plupart des élèves pensent que le mouvement de l'objet va avoir une influence sur les intensités relatives des deux forces réciproques.

2.4. Conclusion sur la validation du test 2

Tout comme pour le test 1, la comparaison entre les réponses écrites des élèves interviewés et leurs réponses orales au moment de l'entretien a confirmé les résultats obtenus par l'analyse des réponses écrite. En particulier, nous avons vu que ce test permettait d'obtenir un très bon indicateur de la compréhension des élèves sur l'identification des interactions et des forces, le lien entre les interactions et les forces et le principe des actions réciproques. Pour les trois entretiens, aucun commentaire d'élève n'a contredit l'analyse de sa compréhension faite à partir de sa réponse écrite.

On peut donc considérer que les enseignants peuvent utiliser ce test pour recueillir des informations qui leur donneront un bon indicateur de la compréhension de leurs élèves sur le concept de force.

3. Test 3

Comme nous l'avons fait pour le test 2, nous présentons une analyse thématique du contenu mis en jeu dans le test 3. Il s'agit de l'utilisation des lois de la mécanique et du principe des actions réciproques.

3.1. Les lois de la mécanique

Pour les lois de la mécanique, nous distinguons deux utilisations :

- le passage du mouvement aux forces qui consiste à utiliser les lois pour passer d'informations sur la nature du mouvement d'un système au fait que les forces exercées sur ce système se compensent ou ne se compensent pas ;
- le passage inverse : des forces au mouvement.

3.1.1. Passage du mouvement aux forces

Dans l'exercice 1 du test 3, on a proposé aux élèves quatre situations (une pierre suspendue à un élastique qui est en mouvement rectiligne non uniforme vers le haut, un enfant immobile debout sur le sol, un palet attaché à un fil en mouvement circulaire sur la glace, une voiture tirée par une dépanneuse en mouvement rectiligne uniforme). On demande aux élèves de dire si les forces qui s'exercent sur les systèmes pierre, enfant, palet et voiture se compensent.

Voici les résultats obtenus à partir de l'analyse des réponses écrites :

- 68 élèves (sur 90, soit 75,5%) ont répondu correctement à toutes les questions ;
- 15 élèves (soit 17%) ont répondu correctement à trois de ces questions parmi lesquels 7 se sont trompés uniquement dans la 3^{ème} colonne (palet en mouvement circulaire) et 6 se sont trompés uniquement dans la 4^{ème} colonne (voiture en mouvement rectiligne uniforme) ;
- 5 élèves (soit 5,5%) ont répondu correctement à deux de ces questions et se sont trompés dans la 3^{ème} colonne et la 4^{ème} colonne ;
- 2 élèves (soit 2%) n'ont répondu correctement à aucune de ces questions.

Pour les justifications utilisées pour répondre à la question « les forces se compensent-elles ? », le Tableau 11-17 présente les principales catégories trouvées et le nombre d'élèves se trouvant dans chacune de ces catégories pour les 4 colonnes.

Tableau 11-17. Répartition des justifications des élèves à la question 1 de l'exercice 1 selon les principales catégories.

	pierre (rect. non unif.)	enfant (immobile)	palet (circulaire)	voiture (rect. unif)
lien correct entre mouvement et forces	68/88	85/90	66/86	71/89
lien incorrect entre mouvement et forces	15/88	0/90	18/86	6/89
confusion principe des actions réciproques	1/88	2/90	2/86	1/89

Il semble donc que la majorité des élèves donne la bonne réponse pour une raison acceptable du point de vue de la physique. Si on fait un croisement pour ces justifications, on voit que 53 élèves sur 90 ont donné une justification correcte dans les quatre situations et 19 élèves ont donné une justification correcte dans trois situations sur quatre.

Il est donc intéressant de regarder le comportement en entretien d'une élève qui a donné la bonne réponse pour toutes les justifications. Nous avons analysé pour ce test les entretiens menés avec Claire, Julien et Louise.

Lors de son entretien, Claire qui avait donné des réponses mettant en jeu un lien correct entre force et mouvement détaille un peu sa pensée :

« j'ai voulu juste dire qu'il y avait pas un mouvement rectiligne uniforme donc c'est et vu que dans l'autre mais j'ai pas précisé que c'était un mouvement accéléré et vu que dans l'autre même si c'est un circulaire il avait quand même pas un mouvement rectiligne uniforme aussi donc c'est pour ça »

Elle fait bien le parallèle entre les colonnes 1 et 3 qui présentent des mouvements qui ne sont pas rectiligne uniforme. Elle semble donc bien séparer d'un côté l'immobilité et le mouvement rectiligne uniforme et de l'autre côté les mouvements différents de rectiligne uniforme, ce qui est le critère pertinent du point de vue de la physique pour savoir si les forces se compensent.

Dans le cas de cette élève, l'analyse des réponses à l'ensemble des quatre situations est un bon indicateur de l'acquisition des lois de la mécanique pour passer du mouvement aux forces. On peut donc penser que pour les 53 élèves qui ont justifié correctement dans les quatre colonnes, le passage de la caractérisation du mouvement à la compensation des forces est acquis.

3.1.2. Passage des forces au mouvement

Dans le deuxième exercice du test 3, on propose aux élèves d'étudier une fusée qui coupe ses moteurs en route. Les élèves doivent en déduire qu'il n'y a plus aucune force vers le haut et que par conséquent les forces ne se compensent pas. Ils peuvent alors utiliser les lois de la mécanique pour avoir des informations sur le mouvement possible de la fusée.

L'analyse des réponses écrites nous permet de voir la difficulté des élèves à choisir la

loi appropriée : alors que 69 élèves ont répondu que les forces ne se compensaient pas, seuls 38 élèves ont utilisé la loi « si les forces ne se compensent pas alors le système n'est ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme » ou la loi « si le système est immobile ou en mouvement rectiligne uniforme alors les forces qui s'exercent sur lui se compensent ».

29 élèves (32%) ont répondu l'enchaînement suivant :

- Lorsque la fusée coupe ses moteurs :
 - il y a la force exercée par la Terre sur la fusée (vers le bas) et la force exercée par l'air sur la fusée (vers le bas).
 - Verticalement les forces sur la fusée ne se compensent pas.
 - "Si un système n'est ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse *et/ou* sa direction varient), alors les forces qui s'exercent sur le système ne se compensent pas ".
 - On en déduit que la vitesse varie.
 - La fusée continue à monter en ralentissant.

et 17 élèves (19%) ont répondu l'enchaînement suivant (réponse correcte attendue) :

- Lorsque la fusée coupe ses moteurs :
 - il y a la force exercée par la Terre sur la fusée (vers le bas) et la force exercée par l'air sur la fusée (vers le bas).
 - Verticalement les forces sur la fusée ne se compensent pas.
 - "Si les forces qui s'exercent sur un système ne se compensent pas, alors le système n'est ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire que sa vitesse *et/ou* sa direction varient)".
 - On en déduit que la vitesse varie.
 - La fusée continue à monter en ralentissant.

On voit donc que la majorité des élèves identifie correctement les forces et en conclut des informations pertinentes sur la compensation des forces et sur le mouvement de la fusée mais que ces élèves ont du mal à choisir la loi qui permet ce passage.

L'analyse des entretiens peut nous permettre de comprendre l'origine de cette difficulté. L'analyse de l'entretien mené avec Julien nous donne par exemple quelques renseignements complémentaires :

« en fait là j'ai j'avais pris euh la réponse là pour aller là en fait (son doigt se déplace de bas en haut sur la feuille) alors que je devais faire l'inverse que je devais prendre plutôt que les forces se compensent pas et en déduire que que le mouvement était ralenti » « celle-là (1^{er} encadré) celle-là (2^{ème} encadré) celle là (3^{ème} encadré) j'ai fait comme ça mais disons que à partir du moment où j'ai mis ça

pour moi tout le raisonnement il était fait dans ma tête quoi » « voilà j'ai pff j'ai fait comme j'avais l'habitude de faire quoi »

On voit dans cet extrait que Julien a construit son raisonnement avant de répondre aux questions. Il est parti du fait que la fusée allait ralentir. Il remarque lui-même que c'est le raisonnement habituellement suivi (passage du mouvement aux forces). Cela peut expliquer le fait qu'il ait choisi la loi « Si un système n'est ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse et/ou sa direction varient), alors les forces qui s'exercent sur le système ne se compensent pas ».

Cet exercice permet de voir le raisonnement suivi par les élèves dans le choix de la loi. Les résultats obtenus montre l'habitude « naturelle » qu'ont les élèves de passer du mouvement aux lois et la difficulté qu'ils ont à effectuer le raisonnement inverse. Il est donc important de tester le passage de la compensation des forces vers le mouvement.

3.2. Le principe des actions réciproques

Dans l'exercice 1 présenté plus haut (quatre situations), on demande aussi aux élèves d'appliquer le principe des actions réciproques. Cela nous permet de voir l'influence de la situation sur l'application du principe et déceler une éventuelle confusion entre le principe des actions réciproques et les lois de la mécanique. Cet exercice peut avoir une fonction formative pour l'élève qui réaliserait la différence entre les deux lois : une loi qui s'applique indépendamment du mouvement (principe des actions réciproques) et une loi qui s'applique en fonction du mouvement (loi de la mécanique).

Voici les résultats obtenus à partir de l'analyse des réponses écrites :

- 42 élèves (sur 90, soit 47%) ont répondu correctement à toutes les questions (comparaison de la force exercée par A sur B et la force exercée par B sur A) ;
- 4 élèves (soit 4%) ont répondu correctement à trois de ces questions parmi lesquels 3 se sont trompés uniquement dans la 1^{ère} colonne (pierre élastique, mouvement rectiligne non uniforme) ;
- 31 élèves (soit 34%) ont répondu correctement à deux de ces questions et se sont trompés dans la 1^{ère} colonne (mouvement rectiligne non uniforme) et la 3^{ème} colonne (mouvement circulaire uniforme) ;
- 12 élèves (soit 13%) ont répondu correctement uniquement dans le cas de l'immobilité.

Le Tableau 11-18 présente les principales catégories trouvées et le nombre des réponses d'élèves dans chacune de ces catégories pour les justifications utilisées pour la question « comparer la force exercée par le système 1 sur le système 2 et la force exercée par le système 2 sur le système 1 ».

Tableau 11-18. Répartition des justifications des élèves à la question 2 de l'exercice 1 selon les principales catégories.

	pierre (rect. non unif.)	enfant (immobile)	palet (circulaire)	voiture (rect. unif)
« principe des actions réciproques »	41/80	47/85	38/72	45/83
« principe d'inertie », influence du mouvement	12/80	36/85	14/72	24/83
influence de celui qui agit sur l'autre	20/80	0/85	12/72	12/83
influence de la masse ou de la force	4/80	1/85	2/72	0/83

On remarque d'ailleurs que, pour les colonnes 1 et 2, celui qui agit sur l'autre varie d'un élève à l'autre (l'élastique fait bouger la pierre ou la pierre fait bouger l'élastique ; le fil fait bouger le palet ou le palet fait bouger le fil).

On voit par l'analyse des réponses écrites que les élèves réussissent cette question moyennement et que beaucoup d'entre eux font intervenir le mouvement (ou une caractéristique de l'objet) pour comparer des forces réciproques.

Même si les entretiens n'apportent pas d'information supplémentaire, ces analyses confirment la difficulté du principe des actions réciproques. L'analyse de l'évolution des performances entre les tests 2 et 3 permet de discuter de la possibilité de son acquisition.

3.3. Evolution des performances des élèves entre les tests 2 et 3

Comme nous avons évalué le principe des actions réciproques dans le test 2 et dans le test 3, il est intéressant de regarder l'évolution des performances des élèves entre ces deux tests.

Le test 2 présentait six questions mettant en jeu le principe des actions réciproques (deux questions dans l'exercice 3 et quatre questions dans l'exercice 5). Le test 3 présentait quatre questions mettant en jeu le principe des actions réciproques (quatre colonnes de l'exercice 1). On peut étudier le nombre de bonnes réponses des élèves sur l'ensemble de ces questions pour les deux tests.

Tableau 11-19. Effectif d'élèves ayant répondu conformément au principe des interactions pour 0,1,2,3,4,5 ou 6 questions dans le test 2 et 0,1,2,3 ou 4 dans le test 3.

Tableau 11-19. Effectif d'élèves ayant répondu conformément au principe des interactions pour 0,1,2,3,4,5 ou 6 questions dans le test 2 et 0,1,2,3 ou 4 dans le test 3.	Total
--	--------------

**Evaluer la compréhension des concepts de mécanique chez des élèves de seconde :
Développement d'outils pour les enseignants**

		Test 3 : nombre de fois où l'élève a répondu conformément au principe des actions réciproques dans l'exercice 1 (sur 4)					
		0	1	2	3	4	
Test 2 : nombre de fois où l'élève a répondu conformément au principe des actions réciproques dans l'exercice 3 et dans l'exercice 5 (sur 6)	0	0	1	0	0	0	1
	1	0	4	7	1	9	21
	2	1	6	17	2	22	48
	3	0	1	5	0	5	11
	4	0	0	1	0	2	3
	5	0	0	1	1	1	3
	6	0	0	0	0	1	1
Total		1	12	31	4	40	88

On a indiqué dans le Tableau 11-19 en gras l'effectif d'élèves ayant répondu de manière correcte à toutes les questions mettant en jeu le principe des actions réciproques aussi bien dans le test 2 que dans le test 3. On a indiqué en italique l'effectif d'élèves ayant eu une meilleure performance dans le test 3 que dans le test 2. On peut représenter ces effectifs sous forme graphique (voir Figure 11-1). On voit alors mieux les élèves ayant progressé entre les deux tests.

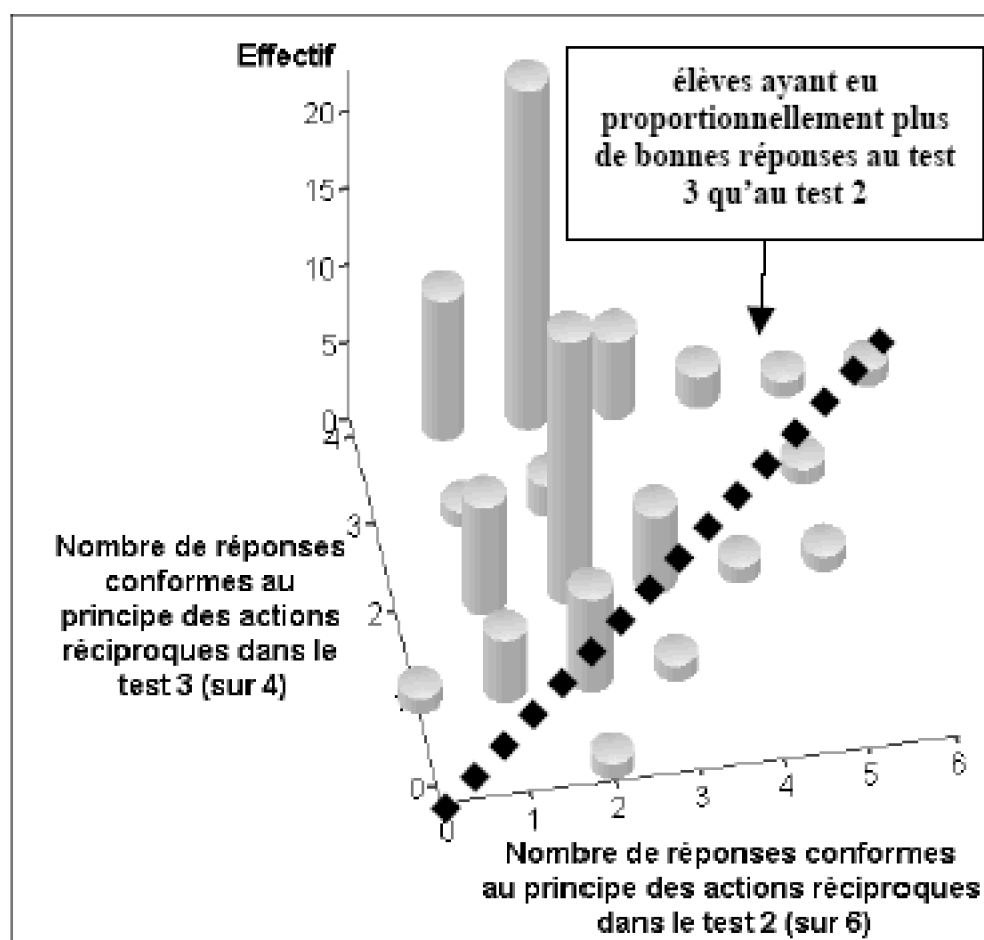


Figure 11-1. Représentation graphique des effectifs d'élèves ayant répondu conformément au principe des actions réciproques pour 0, 1, 2, 3, 4, 5 ou 6 questions dans le test 2 et 0, 1, 2, 3 ou 4 questions dans le test 3.

On observe donc une progression générale, puisque la majorité des élèves ont répondu correctement à plus de questions (proportionnellement) dans le test 3 que dans le test 2. Une analyse un peu plus poussée semble montrer que parmi les élèves qui ont amélioré leur performance, certains n'ont pas réellement progressé. L'analyse des justifications des élèves indique que certains d'entre eux passent du raisonnement « si mouvement alors une force plus grande que l'autre » au raisonnement « si ni immobile ni rectiligne uniforme alors une force plus grande que l'autre ». Aucun de ces raisonnements n'est acceptable. Nous voulions vérifier que les élèves ne confondent pas les lois de la mécanique et le principe des actions réciproques. Il semble que ce soit le cas de ces élèves. Cependant, contrairement à ce que nous pensions, cette confusion s'accompagne d'une hausse de la performance. En effet, puisque les élèves appliquaient lors du test 2 l'égalité de l'intensité des forces uniquement dans le cas de l'immobilité, le fait de l'appliquer dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme augmente le nombre de bonnes réponses. Cette hausse de la performance n'est cependant pas synonyme de progrès dans la compréhension.

L'application du principe des actions réciproques est indépendante des

caractéristiques de la situation (taille, masse et poids des objets, mouvement, etc.). Une compréhension de ce principe implique une application systématique de celui-ci. Une réelle progression ne peut qu'aboutir à cette application systématique. Parmi les élèves qui ont amélioré leur performance, on observe cette progression chez 39 élèves qui sont passés d'une application non systématique du principe des actions réciproques à son application systématique (cf. Tableau 11-19, somme des effectifs de la dernière colonne moins l'élève qui avait déjà répondu correctement aux six questions du test 2). On en conclut qu'il y a eu apprentissage chez ces élèves entre les deux tests, peut-être lié au fait que l'enseignant est revenu sur le principe des actions réciproques au moment de la correction du test 2 (puisque le principe des actions réciproques n'est pas compris dans l'enseignement de la partie 3).

Aucun élève n'a été interviewé sur les tests 2 et 3. Il ne nous est pas possible d'utiliser les entretiens pour valider ces résultats.

3.4. Conclusion sur la validation du test 3

Nous avons vu ici qu'il nous manquait quelques éléments pour pouvoir valider avec assurance l'analyse faite à partir des réponses écrites des élèves par les entretiens. En particulier, le fait de ne pas avoir interviewé d'élèves à la fois sur le test 2 et 3 ne nous permet pas de valider les conclusions faites sur la progression des élèves entre ces deux tests. Cependant, l'étude de cette progression a été faite à partir de l'analyse de la cohérence entre les réponses écrites et nous avons vu pour les deux tests précédents que cette cohérence était validée comme un bon indicateur de la compréhension. Ainsi, l'exercice un permet d'accéder à la cohérence entre les réponses écrites des élèves sur le principe des actions réciproques et sur les lois de la mécanique. Nous avons vu dans le cas d'une élève interviewée que cette cohérence était en accord avec son discours oral et qu'il y avait derrière ses choix un véritable raisonnement (pas de réponse au hasard). Nous avons aussi vu dans le cas de l'exercice 2 que le choix de la loi de la mécanique pour passer de l'information sur la compensation des forces à une information sur le mouvement qui est apparu comme une vraie difficulté reflétait bien une difficulté pour l'élève interviewé qui n'avait pas su voir la différence avec le raisonnement suivi habituellement en classe.

Même si nous n'avons pas toutes les données pour pouvoir valider de façon fiable ce test, nous pouvons dire que le test 3 est un bon outil pour les enseignants qui souhaitent obtenir un indicateur de la compréhension de leurs élèves sur les lois de la mécanique et sur le principe des actions réciproques, en mettant en particulier à leur disposition la possibilité de faire des études de cohérence sur les réponses écrites de leurs élèves.

4. Test 4

Tout comme pour les tests 2 et 3, nous avons choisi ici une présentation thématique des concepts évalués par le biais de l'analyse des réponses écrites complétée par l'analyse des entretiens. Huit entretiens ont été analysés pour cela : les entretiens menés avec Arthur, Anne, Claire, Julien, Louise, Georgia, Alice et Sally.

4.1. Le mouvement

4.1.1. Description du mouvement

Dans le test 4, il y a cinq questions où on demande aux élèves de décrire le mouvement d'un objet dans un référentiel. Dans l'exercice 2, on demande aux élèves de décrire le mouvement d'un enfant debout sur un manège dans le référentiel terrestre (question 2.1) puis dans le référentiel manège (question 2.2). Dans l'exercice 5, il s'agit de décrire dans le référentiel terrestre le mouvement d'une boîte qui ne bouge pas (question 5.1.a), le mouvement d'une boîte mise en mouvement (question 5.2.a) et le mouvement d'une voiture tirée par un camion sur une route droite à vitesse constante (question 5.3.a). Le Tableau 11-20 présente les performances des élèves à ces cinq questions.

Tableau 11-20. Performances des élèves sur les questions demandant une description de mouvement (résultats croisés).

	Fréquence	Pourcentage
aucune réponse correcte	1	0,3%
1 réponse correcte	2	0,5%
2 réponses correctes	15	3,8%
3 réponses correctes	49	12,4%
erreur aux questions 2.1 et 2.2	22	
erreur aux questions 2.1 et 5.2.a	13	
4 réponses correctes	117	29,7%
erreur à la question 2.1	42	
erreur à la question 5.2.a	37	
erreur à la question 2.2	33	
5 réponses correctes	210	53,3%
Total	394	100,0%

On voit donc que, même après enseignement, les élèves ont encore du mal à décrire un mouvement dans un référentiel. Les erreurs les plus fréquentes sont faites dans le cas où on a ni immobilité ni mouvement rectiligne uniforme.

Parmi les élèves interviewés, on trouve des erreurs pour les questions 2.1, 2.2 et 5.2.a. Voici quelques extraits d'entretiens pour mieux comprendre l'origine de ces erreurs.

Il peut s'agir parfois d'un simple oubli comme dans le cas de Sally (très bonne élève) qui a répondu que le mouvement de l'enfant était uniforme dans le référentiel Terre pour la question 2.1 :

« alors là je sais pas ce que j'ai fait j'ai oublié de dire que c'était circulaire (lit) décrire le mouvement de l'objet de l'enfant dans le référentiel Terre le mouvement de l'enfant est uniforme et ben c'est circulaire uniforme » « je pense que c'est un oubli parce que parce que ça me semble trop quoi ça ça me semble trop gros que

que c'était circulaire quoi un manège »

Il peut s'agir d'une véritable incompréhension de ce qu'est le mouvement d'un objet par rapport à un référentiel. Par exemple, pour l'exercice 2, Alice donne la réponse écrite suivante :

question 2 : *Dans le référentiel manège : « Dans le référentiel manège, l'enfant n'est pas immobile, il tourne comme le manège son mouvement est aussi circulaire uniforme. »*

« il était i- il était immobile ou pas (retourne la feuille et lit l'énoncé) non ils mettent qu'il est debout donc euh ah en fait debout ils se disaient pas si il était immobile ou pas debout » « j'ai pris le référentiel manège comme ils disaient et euh et donc là euh du coup comme c'était la force du manège le mouvement euh si l'enfant il était pas immobile euh il tournait en fait comme le manège enfin il tournait euh si le manège tournait lui aussi en fait (mouvement circulaire avec son crayon) »

Il semble que cette élève n'ait pas compris que si l'enfant tourne « comme le manège » c'est qu'il est immobile par rapport au manège. De plus, Alice parle de la « force du manège » alors que les forces ne sont pas à prendre en compte ici.

Un peu plus tard dans l'entretien, Alice explique pourquoi elle n'a pas décrit le mouvement dans le cas de la caisse mise en mouvement dans l'exercice 5 :

« je savais pas trop si le m- quand il poussait la caisse il la poussait droite ou ou par exemple euh sur le côté donc c'est vrai que ça pouvait pas être euh immobile ni rectiligne uniforme parce que il la il commence à la pousser mais euh elle sera pas à la même vitesse enfin mais euh c'est vrai que là j'ai pas su en fait euh si c'était rectiligne non uniforme parce qu'on disait pas si la si la s'il poussait la caisse droite »

Sa réflexion est tout à fait pertinente et montre qu'elle a bien analysé la situation. Selon son analyse, la réponse aurait dû être « non uniforme ». On peut se demander pourquoi elle n'a pas donné de réponse. Il semble en tout cas que plusieurs difficultés viennent se mêler chez cette élève qui a une compréhension partielle du mouvement.

L'entretien mené avec Louise nous apporte un autre type d'informations. Louise a indiqué que la caisse avait un mouvement **rectiligne uniforme** pour la situation 2 de l'exercice 5. Elle réalise son erreur au moment de l'explicitation de ses réponses :

« j'avais mis que c'était rectiligne uniforme parce que l'homme il poussait la caisse mais là aussi je suis en train de me rendre compte que c'est enfin moi j'aurais maintenant en prenant du recul j'aurais plutôt mis rectiligne non uniforme » « parce que moi je pensais que l'homme comme il poussait la caisse et ben je l'imaginais à la même allure dans dans une vitesse constante donc euh » « quand on a expliqué pour la voiture tout à l'heure et que moi j'ai parlé du démarrage que ça y avait forcément un moment où où ça augmentait donc euh euh là c'est pa- j'aurais mis non uniforme parce que c'est pareil c'est comme si là il là il démarrait à à faire pousser la caisse et euh il la met en mouvement donc euh y a un moment où où elle est arrêtée et elle se met à à avancer »

Au moment de l'entretien, Louise fait une bonne analyse de la situation qui lui

permet de corriger son erreur. On peut se demander pourquoi elle n'a pas fait cette analyse au moment du devoir. Une hypothèse est que l'explicitation des réponses facilite le repérage des cohérences.

Après enseignement de l'ensemble de la mécanique, il reste chez les élèves des difficultés pour décrire le mouvement. L'analyse des réponses écrites montre que, dans le cas d'un référentiel différent du référentiel terrestre, les élèves ont souvent du mal à décrire le mouvement. Il semble aussi que l'immobilité et le mouvement rectiligne uniforme soient mieux acquis. Les entretiens nous montrent que les difficultés des élèves sont variées.

4.1.2. Description de la variation de vitesse et de la variation de direction

Puisque dans les lois de la mécanique, les critères pertinents pour discriminer le mouvement sont la variation de vitesse et la variation de direction, nous avons choisi de poser des questions aux élèves sur ces deux composantes du mouvement.

Si l'on se contente de regarder les réponses aux questions posées dans l'exercice 3, on pourrait penser que ces composantes sont bien acquises :

1. Pour chacun des mouvements cités ci-dessous, cochez sur chaque ligne la première case si la direction varie et cochez la deuxième case si la vitesse varie (on pourra avoir 0, 1 ou 2 cases cochées)		
mouvement rectiligne uniforme	2,3% la direction varie	1,6% la vitesse varie
mouvement circulaire uniforme	83% la direction varie	5,3% la vitesse varie
mouvement rectiligne non uniforme	5,5% la direction varie	97,7% la vitesse varie
immobilité	3,8% la direction varie	2,5% la vitesse varie

Figure 11-2. Performances des élèves (pourcentages) pour la question 1 de l'exercice 3.

Cependant, d'après le reste de l'analyse des réponses écrites, il semble qu'il y ait certaines difficultés.

Par exemple, pour la question 1.2 : « Une voiture démarre sur une ligne droite. Sa vitesse est constante », le but est de savoir si les élèves savent que lors d'un démarrage (situation du champ expérimentale), le mouvement est non uniforme (description en termes de modèle). On retrouve donc un peu le type de question posée dans le test 1 à propos des voitures qui font la course. Là encore, on a intégré un élément non pertinent dans l'énoncé : le fait que la voiture démarre en ligne droite. Le Tableau 11-21 présente les réponses et justifications des élèves à cette question.

		réponse à question 1.2			Total
		faux	on ne peut pas savoir	vrai	
catégorie de la justification	pas de justification	4	6	1	11
	justification correcte				
	démarrage implique variation de vitesse	158	2	1	161
	la voiture était immobile au départ	92	0	1	93
	description non justification				
	la vitesse augmente	36	1	0	37
	le mouvement est rectiligne non uniforme	4	0	0	4
	justification incorrecte				
	la vitesse peut varier	3	15	1	19
	le conducteur fait ce qu'il veut	0	10	0	10
	la voiture peut démarrer avec une vitesse non nulle	0	1	0	1
	pas assez d'informations	0	15	0	15
	pas de lien avec trajectoire	1	11	1	13
	justification « hors-sujet »				
	trajectoire rectiligne	2	0	4	6
	autre	12	6	6	24
Total		312	67	15	394

Tableau 11-21. Répartition des réponses des élèves (case cochée et justification) pour la question 1.4.

On voit donc dans l'analyse des réponses des élèves que l'erreur décelée au moment du test 1 se retrouve dans les réponses des élèves au test 4. En effet, 52 élèves répondent « on ne peut pas savoir » et donnent ce que nous avons appelé une « justification incorrecte » en pensant que la situation ne permet pas de répondre à la question. On peut penser qu'ils ne considèrent pas le démarrage dans son ensemble. Il y a même un élève qui justifie en disant explicitement que la voiture peut démarrer avec une vitesse non nulle.

De même, dans la question 1.5 : « Un objet a un mouvement circulaire dans le référentiel terrestre. La direction de son mouvement ne varie pas », les performances des élèves ne sont pas très bonnes, puisque seuls 55,1% des élèves répondent FAUX. Ce décalage entre la performance des élèves à cette question et la performance des élèves à l'exercice 3 où 83% des élèves répondent que la direction varie dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme illustre l'intérêt de poser plusieurs questions ayant le même objectif d'évaluation.

On peut regarder le contenu des entretiens pour voir si ces difficultés sont bien réelles chez les élèves qui donnent des mauvaises réponses à l'une ou l'autre de ces questions de l'exercice 1.

Voici : la réponse écrite de Julien à la question 1.2 ainsi que l'extrait de l'entretien où Julien commente sa réponse :

On ne peut pas savoir « On ne peut pas l'affirmer avec ces seules informations. »

Il semble bien d'après les commentaires oraux de Julien que lorsqu'il indique qu'on n'a pas assez d'informations dans l'énoncé, c'est qu'il considère que la voiture peut

démarrer avec une vitesse non nulle. Il ne considère donc pas le démarrage dans sa totalité et ne prend pas en compte le moment où la voiture passe de l'immobilité à une vitesse non nulle.

Arthur n'a pas répondu à la question 1.5. Lorsqu'on lui demande pourquoi, il explique qu'il aurait voulu avoir un exemple comme dans les autres situations. En effet, cette question est la seule où l'information contenue dans la première proposition est énoncée dans les termes du modèle (« mouvement circulaire dans le référentiel terrestre »). Cependant, ce n'est pas là la seule difficulté d'Arthur qui dit ensuite :

Arthur ne sait donc pas ce qu'est la direction, ce qui ne l'empêche pas de répondre correctement à toutes les questions de l'exercice 3.

On remarque même que Georgia a répondu correctement à toutes les questions sur la variation de direction alors qu'elle avoue pendant l'entretien :

Il semble donc que cette élève ait répondu juste aux questions par écrit alors qu'elle ne maîtrise pas les notions de direction et de sens. Elle rajoute au moment du commentaire de l'exercice 3 :

Elle veut dire ici que si aujourd'hui elle pense que le sens correspond à la ligne sur laquelle on se déplace et la direction est l'endroit vers lequel on se dirige, elle pensait l'inverse au moment du devoir (ce qui était correct du point de vue de la physique enseignée). Ceci illustre bien le fait qu'une bonne réponse écrite correspond à un bon raisonnement mais que ce raisonnement n'est pas nécessairement stable dans le temps. Il est important d'être conscient d'évaluer l'élève à un instant t et de savoir que si on réalisait l'évaluation plus tard, on n'obtiendrait pas les mêmes résultats. Cela ne remet pas en cause la validité du test. Les connaissances de l'élève peuvent évoluer au cours de l'apprentissage. La vérification d'obtenir les mêmes résultats dans le temps n'est donc pas un bon critère pour valider un test. Il faut simplement être conscient des limites des conclusions qu'on peut tirer à partir d'une évaluation.

4.2. Les forces

Le test 4 a été développé pour évaluer aussi les connaissances des élèves relatives au concept de force. Nous regardons ici différentes composantes du concept de force afin d'analyser les performances des élèves.

4.2.1. Force exercée par la Terre

Le Tableau 11-22 indique les performances des élèves sur les cinq questions du test 4 mettant en jeu la force exercée par la Terre (exercice 1 questions 4 et 6 : un oiseau vole dans les airs/un homme nage dans une piscine. la Terre exerce une force sur lui ; exercice 5 : faire la liste des forces qui s'exercent sur les systèmes étudiés : une caisse posée sur le sol, une caisse mise en mouvement par un homme, une voiture tirée par une dépanneuse, cf. énoncé pp.137 et suivantes).

réponse à la question 1.6	réponse à la question 1.4	réponse à l'exercice 4 : présence de la force exercée par la Terre dans la liste des forces					
		aucune colonne	deuxième colonne seulement	première colonne seulement	première et dernière colonnes seulement	première et deuxième colonnes seulement	troisième colonne
faux, pas de réponse, on ne peut pas savoir	faux, pas de réponse, on ne peut pas savoir	1		1			16
	vrai	1		0			41
vrai	faux, pas de réponse, on ne peut pas savoir	2	0	1	0	1	7
	vrai	6	1	2	1	2	310

Tableau 11-22. Effectif des élèves ayant systématiquement indiqué la force exercée par la Terre dans le test 4.

- 310 élèves (sur 393, soit 78,9%) ont systématiquement indiqué la force exercée par la Terre ;
- 41 élèves (soit 10,4%) n'ont pas indiqué la force exercée par la Terre uniquement dans le cas d'un homme qui nage dans une piscine ;
- 16 élèves (soit 4,1%) n'ont pas indiqué la force exercée par la Terre dans le cas d'un objet pas en contact avec le sol (deux questions de l'exercice 1) ;
- 10 élèves n'ont jamais indiqué la force exercée par la Terre dans l'exercice 5 ;
- 1 seul élève n'a jamais indiqué la force exercée par la Terre.

L'analyse des justifications écrites pour cette question montre qu'environ 13% des élèves (51 sur 394) disent qu'il y a une force exercée par la Terre sur l'oiseau et donnent une justification en revenant à la manifestation de cette force (par exemple : « S'il n'y avait pas de force, l'oiseau n'aurait pas besoin de voler » ou « Si l'oiseau arrête de battre des ailes il tombe »). Une grande partie des élèves (181 sur 394 soit 46%) donne une justification proche de « Il y a toujours une force » . Nous avons remarqué dans notre étude préalable qu'au début de l'enseignement, les élèves avaient le plus souvent besoin de donner un sens à la force et de passer par une manifestation de cette force. Il semble donc que l'enseignement a provoqué chez les élèves un changement de justification de l'« existence » d'une force. Les situations pour lesquels certains élèves n'indiquent pas de force exercée par la Terre (oiseau dans les airs, homme dans piscine) peuvent laisser penser que ces élèves considèrent qu'il n'y a pas de manifestation de l'action de la Terre sur ces objets. Les entretiens peuvent nous permettre de vérifier si c'est le cas des élèves interviewés.

On peut prendre l'exemple d'Arthur qui a répondu qu'il n'y avait pas de force exercée par la Terre dans le cas de l'oiseau dans les airs et de l'homme dans la piscine.

Voici sa justification écrite pour la question 1.4 (oiseau dans les airs) :

Faux, la Terre n'exerce pas de force sur l'oiseau qui est en train de voler car il vole, il plane, il reste dans les airs. Si on aurait dit que l'oiseau atterrissait là, il y aurait une force exercée par la Terre.

Voici le commentaire oral associé à cette réponse qu'Arthur nous a donné au moment de l'entretien :

« il atterrit pas si il aurait atterri ça serait y aurait euh ben la Terre s'il aurait atterri ben la Terre elle aurait exercé k- une force tandis que là là il vole et y a pas de force qui le fait qui le fait descendre en fait » « si ils auraient précisé comme quoi il atterrissait il commençait à atterrir on aurait pu dire que y avait une force exercée par la Terre sur euh sur euh sur lui quoi sur l'oiseau »

Lorsqu'on demande à l'élève s'il s'agit de la distance au sol ou du fait qu'il soit en train de descendre, voici ce que l'élève répond :

Interviewer : « c'est une question de distance à au sol ou quand tu dis il atterrit ou c'est le fait qui descend ou c'est » Arthur : « le fait qu'il descende ouais qu'il soit que la Terre est enfin le fait descendre si ils avaient précisé mais comme là ils disent que l'oiseau il vole donc si il vole le y a pas de force exercée par la Terre sur euh sur lui quoi »

On voit donc que pour cet élève, il doit y avoir une « manifestation visible de la force », c'est-à-dire que l'objet doit avoir un mouvement vers le bas pour que la Terre exerce une force sur lui.

4.2.2. Force « de contact »

Nous avons choisi de différencier la force exercée par le sol des autres forces exercées par des objets en contact car les performances des élèves étaient notablement différentes. De plus, la confusion entre la Terre et le sol (que nous avons déjà évoquée dans l'analyse du test 2) donne au sol un statut particulier.

Si on regarde le taux de réussite aux questions mettant en jeu des forces « de contact » (à part le sol) :

- sur 4 questions (Exercice 1 : question 1 (caillou sur camion) ; Exercice 5 : homme sur caisse immobile, homme sur caisse mise en mouvement et camion sur voiture)), 289 élèves (sur 394, soit 73,4%) ont indiqué systématiquement les forces « de contact » (mis à part le sol) ; seul 1 élève n'a jamais indiqué ces forces.

Si on regarde le taux de réussite aux questions mettant en jeu la force exercée par le sol sur un objet immobile ou en mouvement sur le sol :

- sur 4 questions (Exercice 4 ; Exercice 5 : sol sur caisse immobile, sol sur caisse mise en mouvement et route sur voiture)), 228 élèves (sur 369 soit 61,8%) ont indiqué systématiquement la force exercée par le sol ; 40 élèves (soit 10,8%) n'ont jamais indiqué de force exercée par le sol (sur ces 4 situations).

Si on regarde les performances des élèves relatives à l'identification de la force exercée par le sol en fonction des classes, on remarque des différences de taux de réussite :

- Si, en moyenne, 61,8% des élèves ont indiqué systématiquement la force exercée par le sol, ce taux de réussite varie selon les classes de 8,7% (classe L) à 84,4% (classe C1) ;
- Si, en moyenne, 10,8% des élèves n'indiquent jamais cette force, ce taux varie de 0% (classes A2, C1, I) à 39,1% (classe L).

Même si on observe des différences de performances selon les classes, on voit donc que le taux de réussite est plus élevé pour l'identification des forces exercées par des objets en contact autres que le sol.

Parmi les élèves interviewés, certains ont des difficultés pour la force exercée par le sol. Arthur et Georgia semblent confondre la Terre et le sol dans certains cas :

« y a la force ben exercée par la glace sur le palet pour que qui l'empêche de s'enfoncer » (Arthur, exercice 4) ; « j'ai mis la force exercée par la Terre sur la caisse parce que ça l'empêche de s'enfoncer la caisse » (Arthur, exercice 5, colonne 1) « c'est une force qui ben le sol il attire le palet vers le bas donc c'est vers le bas et puis dans les exercices qu'on a faits en physique c'est toujours vers le bas » « dans les exercices y avait toujours une force vers le bas » (Georgia, exercice 4)

Voici au contraire un commentaire oral d'une bonne élève qui a systématiquement indiqué toutes les forces de contact correctement :

« l'homme il exerce une force sur la caisse vu qu'il la pousse le sol vu qu'elle est posée dessus et puis ben la Terre vu que c'est tout le temps » (Claire, exercice 5, colonne 1)

Le contenu des entretiens confirme que les élèves qui n'indiquaient pas la force exercée par le sol (ou lui donnaient des caractéristiques incorrectes) n'avaient pas compris la différence entre le sol et la Terre et les deux actions modélisées par la force exercée par le sol et la force exercée par la Terre. Il semble qu'au contraire les élèves qui indiquent systématiquement les forces de contact correctement aient bien compris à quoi correspondaient ces forces.

4.2.3. Force « motrice »

Dans ce test, on a évalué deux fois le fait d'indiquer une force exercée par l'agent ayant lancé ou poussé un objet (Exercice 4 : présence de la force exercée par le joueur sur le palet ; Exercice 6 : présence de la force par l'arbitre sur le ballon). Le Tableau 11-23 présente les performances des élèves relatives à ce point.

81 élèves (sur 368, soit 22,0%) n'ont indiqué ni la force exercée par le joueur sur le palet, ni la force exercée par l'arbitre sur le ballon. Ce résultat est meilleur que celui trouvé par Palmer (1994) pour des élèves de niveau équivalent (7% n'ont pas indiqué de force dans le sens du mouvement). 58 élèves (sur 368, soit 15,8%) ont indiqué la force exercée par le joueur sur le palet et la force exercée par l'arbitre sur le ballon. On peut donc considérer que seule une minorité d'élèves (22,0%) a acquis cet aspect du modèle des forces. On peut nuancer ce résultat en notant que la présentation de l'exercice 6 a pu laisser penser certains élèves qu'il fallait simplement cocher la caractéristique de la force

sans se demander préalablement si cette force s'exerçait.

caractéristique de la force exercée par le joueur	force exercée par l'arbitre vers le haut		Total
	oui	non	
pas de force	165	81	246
vers la droite	58	11	69
vers le haut	24	4	28
vers la gauche	11	0	11
vers le bas	7	0	7
diagonale	3	0	3
autre	1	3	4
Total	269	99	368

Tableau 11-23. Performances des élèves (résultats croisés) sur les questions mettant en jeu une « force motrice ».

Là encore, les performances dépendent de la classe :

- dans la classe B, 58,8% des élèves n'ont jamais indiqué de force motrice et 2,9% ont indiqué cette force dans les deux situations ;
- dans la classe A2, 28,1% des élèves ont indiqué une force motrice dans les deux situations.

Les entretiens nous montrent que parmi les élèves interviewés, ceux qui ont indiqué ce type de force lui donnent un statut différent des autres forces. On peut prendre par exemple le cas de Claire, très bonne élève, qui a commis comme seules erreurs dans son devoir d'indiquer ces deux forces. Voici ce qu'elle nous a dit en entretien :

« je savais pas trop comment expliquer euh la force euh de l'élan du c'était ça qui me bloquait sinon ouais je savais à peu près ben par exemple pour la glace qu'elle allait y être c'est vu qu'elle est dessus mais c'est vrai que » « en premier j'ai fait c- déjà j'étais sûre qu'il y avait celle de la glace l'action de la glace donc j'ai essayé de la positionner et euh par rapport au raisonnement que j'avais eu là sur le sol (montre l'exercice 5) ben j'ai refait un peu pareil vu que je me suis dit que la glace devait ralentir un peu le palet dans son avancée et puis il empêche ça empêchait la gla- non le palet de s'enfoncer aussi » « j'arriv- j'arrivais pas à modéliser pourquoi euh la qui faisait que le palet il avançait quand même en fait » « c'était ayant été lancé donc techniquement il est plus en action contre euh contre la crosse du joueur donc il est donc y a plus rien qui donc je savais pas trop comment faire » (Claire, exercice 4)

On voit donc que cette élève n'est pas dans un raisonnement de style « impetus » et qu'elle tient compte de certains éléments du modèle enseigné.

Il y a même des élèves qui nous ont dit en entretien qu'ils avaient répondu en pensant qu'il s'agissait du moment où le joueur tapait dans le palet.

Dans ce cas-là, la réponse est correcte du point de vue de la physique et

l'erreur provient d'une erreur de lecture ou de représentation de l'énoncé :
« j'ai mis la force exercée euh par le joueur sur le palet mais en fait euh je suis pas sûre qu'elle y soit parce que enfin ça dépend quand c'est qu'on quand est-ce qu'on regarde » « là je pensais que c'était quand c'est quand le joueur il frappe dans le palet quoi » (Anne, exercice 4)

Aucun des élèves interviewés ne nous a dit qu'il était sûr qu'il y avait une force exercée par le joueur sur le palet en train de glisser ou sur le ballon en train de monter.

Il est important de faire remarquer aux enseignants que les élèves sont en train de passer d'un modèle à l'autre et que leurs erreurs ne signifient pas nécessairement qu'ils font fonctionner uniquement un raisonnement « impetus ».

4.2.4. Liste des forces

Après avoir regardé l'identification de chaque « type » de force, il est aussi important de regarder si les élèves sont capables d'identifier toutes les forces qui s'exercent sur un système pour une situation donnée. C'est ce qu'ils devaient faire dans l'exercice 5 où on leur demandait la liste des forces qui s'exerçaient sur une caisse poussée par un homme mais qui ne bouge pas, une caisse mise en mouvement par un homme et une voiture tirée par un camion. Nous avons considéré comme correcte une liste des forces où l'élève citait la force exercée par la Terre, la force exercée par le sol et la force exercée par l'homme ou le camion selon la situation. Nous n'avons pas regardé si l'élève avait indiqué la force exercée par l'air puisque les critères de prise en compte de cette force varient d'un enseignement à l'autre. Nous n'avons pas considéré comme correcte une liste où figurait d'autres forces (par exemples des forces exercées par le système étudié ou « la force de la masse »).

Tableau 11-24. Performance des élèves (résultats croisés) sur les questions mettant en jeu la liste des forces exercées sur un système.

liste des forces colonne 1 (caisse immobile)	liste des forces colonne 2 (caisse mise en mouvement)	liste des forces colonne 3 (voiture)	
		incomplète	complète
incomplète	incomplète	115	14
	complète	6	43
complète	incomplète	4	4
	complète	9	199

- 199 élèves (sur 394, soit 50,5%) font systématiquement une liste complète des forces ;
- 115 élèves (sur 394, soit 29,2%) font systématiquement une liste incomplète des forces.

L'analyse des réponses écrites montre donc que seule la moitié des élèves est capable de faire la liste des forces. Cette faible performance est liée au fait que les élèves ont des difficultés à identifier la force exercée par le sol. Cette erreur est un facteur limitant de la

réussite à la liste des forces. Cependant, il s'agit d'un résultat intéressant car on se situe dans une situation simple ne mettant pas en jeu de force motrice et le taux de réussite est relativement bas.

Lors l'analyse des entretiens, dans les cas où les élèves indiquaient comment ils avaient fait pour faire la liste des forces, nous avons vu qu'ils la faisaient consciencieusement et qu'ils faisaient la plupart du temps correspondre à chaque force une action. Il est plus délicat de s'assurer par cette méthode d'entretien que les élèves étaient conscients de ne pas indiquer certaines forces ou avaient envisagé ces forces et avaient choisi de ne pas les indiquer. Le fait de leur demander « *comment as-tu su qu'il n'y avait pas la force exercée par le sol ?* » les aurait probablement incité à se justifier voire à revenir sur leur réponse.

4.2.5. Schéma des forces

Nous avons remarqué que très peu de schémas des forces étaient réussis par les élèves. En tenant compte de la compensation des forces pour dire si un schéma était correct ou non, on obtient que :

- parmi les 359 élèves qui ont fait le schéma de l'exercice 4, 33 élèves l'ont fait correctement ;
- parmi les 352 élèves qui ont fait les 3 schémas de l'exercice 5, 27 l'ont fait systématiquement de manière correcte et 257 les ont systématiquement faits faux.

Sans tenir compte de la compensation des forces (en regardant juste la présence et les caractéristiques des forces), les performances sont nettement meilleures :

- 151 élèves ont fait « correctement » le schéma de l'exercice 4 ;
- parmi les 352 élèves qui ont fait les 3 schémas de l'exercice 5, 95 l'ont fait systématiquement de manière « correcte » et 173 les ont systématiquement faits faux.

On voit donc ici que tenir compte de la compensation est une vraie difficulté pour les élèves lorsqu'ils représentent un schéma des forces. La comparaison entre la réponse en langue naturelle de l'élève à la question de l'exercice 5 « les forces se compensent-elles ? » et la compensation des forces sur le schéma confirme cette difficulté.

Tableau 11-25. Cohérence représentationnelle des élèves sur la compensation des forces (exercice 5).

**Evaluer la compréhension des concepts de mécanique chez des élèves de seconde :
Développement d'outils pour les enseignants**

Situation / Colonne	L'élève a indiqué que les forces se compensaient et sur le schéma les forces se compensent	L'élève a indiqué que les forces ne se compensaient pas et sur le schéma les forces ne se compensent pas	L'élève a indiqué que les forces ne se compensaient pas et sur le schéma les forces se compensent	L'élève a indiqué que les forces se compensaient et sur le schéma les forces ne se compensent pas
1	170	29	8	156
2	4	288	18	38
3	113	44	6	177

Là encore, les entretiens nous éclairent sur la façon dont les élèves tiennent compte de la compensation au moment où ils représentent leur schéma. Tous les exemples sont pris dans le cas de la première colonne de l'exercice 5 (« un homme pousse une caisse sans que celle-ci ne bouge »).

Pour Anne, « les forces se compensent » semblent signifier que les forces ont la même longueur :

Question	réponse écrite	réponse orale
Les forces se compensent-elles ?	oui	« comme c'est immobile donc oui quand l'objet est immobile ben les forces elles se compensent »
Schéma des forces		« j'ai mis toutes les forces qu'il y a là et donc je les ai fait toutes de même ouh ouh de même longueur comme ouh comme les forces elles se compensent ben (regarde sa feuille) elles devaient être de même longueur » au moment de l'entretien : « ouais : pense qu'il faut un nombre de forces pair pour qu'elles puissent se compenser (critère : même direction, même longueur, sens opposés → deux par deux) »

Anne a donc bien identifié les forces, leur a donné des caractéristiques acceptables (force exercée par la Terre vers le bas, force exercée par l'homme dans le sens de la poussée, force exercée par le sol vers le haut). La somme vectorielle n'est pas nulle mais l'élève pense au moment de la réalisation du schéma qu'il suffit que les forces aient même longueur. Elle change de critère au moment de l'entretien en déduisant d'un critère correct (même direction, même longueur, sens opposés) une condition incorrecte (avoir un nombre pair de forces). Une meilleure connaissance de la signification vectorielle de la compensation des forces lui aurait peut-être permis d'améliorer son schéma.

Cependant, on se rend compte que lorsque plusieurs contraintes « incompatibles » se mêlent, le choix de l'élève pour l'une ou l'autre de ses contraintes ne va pas toujours dans le bon sens. Par exemple, dans le cas de Louise, on a une incompatibilité entre le fait que les forces doivent se compenser puisque l'objet est immobile et le fait que les forces ne se compensent pas sur le schéma. Louise semble connaître une caractéristique de forces qui se compensent (même direction et sens opposés) et préfère ne pas appliquer la loi de la mécanique (et donc remettre en cause le fait que les forces se compensent) plutôt que de remettre en cause son schéma (voir page suivante).

Question	réponse écrite	réponse orale
Les forces se compensent-elles ?	oui	« j'ai mis qu'elles se compensaient vu que vu que l'homme vu que la caisse elle était immobile donc j'ai dit j'ai dit j'ai pensé à à la loi que dit si un objet il est immobile et ben les forces elles se compensent » « là je suis en train de me rendre compte que là j'ai fait une erreur parce que quand euh quand les forces elles se compensent elles sont de même direction mais de sens opposés et là elles d- ben je l'ai pas fait de de même direction » « en fait je le dessinerais peut-être mais je pense que les forces elles se compenseraient pas vu que vu que en fait elles ont pas de même direction je montrerais non en fait toi » « ben vu que moi je voyais que l'homme il poussait la caisse vers la droite donc j'ai fait vers la droite et euh donc euh y a la force exercée par la Terre et comme euh la caisse elle est immobile donc euh les deux vecteurs je les ai fait de la même taille »
Schéma des forces		

Le repérage de son erreur aurait pu au contraire lui faire remettre en cause le schéma et lui faire ainsi réaliser qu'elle avait oublié une force (la force exercée par le sol sur la caisse).

Chez les élèves qui ne se trompent pas, toutes ces contraintes confortent l'élève dans sa réponse. Julien semble avoir compris la signification « vectorielle » de la compensation des forces. De plus, il n'a pas fait d'erreur au moment de l'identification des forces :

Question	réponse écrite	réponse orale
Les forces se compensent-elles ?	Oui car le système est immobile	« quand c'est immobile ou rectiligne uniforme les fo- les forces se compensent » « j'ai fait la force de l'homme sur la caisse de la Terre sur la caisse du sol sur la caisse mais au même temps comme la caisse ne bouge pas j'en ai déduit pareil que c'était à cause de à cause de frottements qui finissent euh enfin euh euh qui euh qui s'opposent à la force de l'homme sur la caisse et comme la caisse est immobile je les ai faits de même intensité que la force de l'homme sur la caisse » J : « d'accord est-ce que ces ces deux-là (force exercée par l'homme et par la Terre ?) celle là et celle là elles ont la même longueur » « j'en suis sûr ça a pas d'importance de toute manière »
Schéma des forces		

Sally explicite même la cohérence représentationnelle :

Question	réponse écrite	réponse orale
Les forces se compensent-elles ?	oui car la caisse est immobile (principe d'inertie)	« on avait fait le même ex- le même exercice en cours » « c'était pareil c'était un objet tenu euh sur une table euh qu'on poussait c'était pareil » « là je viens de dire que les forces se compensent donc il faut que la somme vectorielle des forces elle soit égale à zéro » « la force de la Terre euh c'est tout le temps vers le bas » « l'homme il pousse euh il pousse là la caisse dans ce sens là quoi il la pousse comme ça donc ça fait comme ça et après les frottements c'est oblique parce qu'il faut que ça fasse zéro quoi enfin c'est un vecteur nul » « ça me semble logique que ce soit oblique puisque ça empêche euh l'homme de déplacer la caisse quoi puis je le fais aussi pour que ça soit nul »
Schéma des forces		

4.3. Les lois de la mécanique

4.3.1. Passage du mouvement à la compensation des forces

Dans le test 4, quatre questions mettent en jeu les lois de la mécanique en demandant aux élèves de décrire le mouvement d'un système puis de dire si les forces qui s'exercent sur ce système se compensent. Sans tenir compte du fait que les mouvements décrits par les élèves étaient corrects ou non, nous avons analysé le lien entre le mouvement décrit par l'élève et sa réponse sur la compensation des forces dans les exercices 2 et 5. Le Tableau 11-26 présente la performance des élèves sur l'ensemble de ces quatre questions.

Tableau 11-26. Performance des élèves sur l'ensemble des quatre questions mettant en jeu les lois de la mécanique pour passer du mouvement aux forces : effectif correspondant au nombre de bonnes réponses (sur 4).

	Fréquence	Pourcentage
0	5	1,3%
1	22	5,6%
2	66	16,8%
3	120	30,5%
4	181	45,9%
Total	394	100,0%

On voit ici que moins de la moitié des élèves utilise de manière systématique et correcte les lois de la mécanique pour passer du mouvement à la compensation des forces. Cependant, on a quand même les trois-quarts des élèves qui répondent correctement à au moins trois questions sur quatre. Une analyse un peu plus poussée nous a permis de voir que ces résultats sont très dépendants de la classe. Après avoir analysé les performances des élèves pour le passage des forces au mouvement, nous présentons les résultats pour chaque classe.

4.3.2. Passage de la compensation des forces au mouvement (sur 3)

Dans l'exercice 3, à partir du schéma de l'ensemble des forces qui s'exercent sur un système, on demande aux élèves de dire quels sont les mouvement possibles de ce système. On a considéré comme correctes pour la situation 2 les réponses où les élèves avaient coché immobile et rectiligne uniforme puisqu'il s'agit de l'application directe des lois de la mécanique. Pour les situations 1 et 3, puisque les lois ne permettent pas de savoir directement quels sont les mouvements possibles mais permettent d'éliminer les mouvements « impossibles », on a considéré comme correctes les réponses où les élèves avaient coché mouvement circulaire uniforme et/ou rectiligne non uniforme.

Tableau 11-27. Performance des élèves sur l'ensemble des trois questions mettant en jeu les lois de la mécanique pour passer des forces au mouvement : effectif correspondant au nombre de bonnes réponses (sur 3).

situations pour lesquelles la réponse de l'élève est correcte	Fréquence	Pourcentage
aucune	39	9,9%
S3	105	26,6%
S2	9	2,3%
S2 et S3	40	10,2%
S1	8	2,0%
S1 et S3	44	11,2%
S1 et S2	4	1,0%
S1, S2 et S3	145	36,8%
Total	394	100,0%

On voit donc que les performances sont moins bonnes pour ce passage que pour le passage du mouvement à la compensation des forces (45,9% de réussite). On peut trouver plusieurs raisons à cela. Une analyse de la séquence d'enseignement et des manuels de physique montre que, dans la majorité des exercices, on demande aux élèves de décrire le mouvement puis de dire si les forces se compensent, même si le principe d'inertie tel qu'il est présenté dans le programme permet de passer d'une information sur les forces à une information sur le mouvement (« un objet qui est soumis à des forces qui se compensent est immobile ou a un mouvement rectiligne uniforme »).

L'analyse de l'exercice 2 du test 3 nous avait déjà montré que les élèves ont tendance à passer d'abord par le mouvement pour savoir si les forces se compensent.

L'analyse des entretiens nous amène des informations complémentaires, plus spécifiques des difficultés des élèves à effectuer le passage des forces vers le mouvement.

Par exemple, Georgia (élève en difficulté) soulève un point très intéressant. Pour le premier schéma présentant uniquement une force exercée vers le bas, voici sa réponse écrite :

L'objet est immobile, seulement attiré par la Terre.

On peut donc penser qu'elle confond Terre et sol, ou qu'elle considère un objet immobile dans les airs seulement attiré par la Terre. Voici un extrait de l'entretien :

« ben fallait prendre des exemples enfin moi j'ai pris des exemples déjà pour cette question donc euh rectiligne uniforme euh donc en fait là on voit (geste sur le schéma 1) qu'il y a qu'un contact et ça peut qu'avec la Terre et rectiligne uniforme ça veut forcément dire (geste droit devant elle) que le mou- qu'il est en mouvement (geste droit devant elle) donc là il peut pas être en mouvement étant donné que c'est c'est qu'en contact avec la Terre et donc euh c'est qu'un objet en contact avec la Terre parce que par exemple si on prenait la voiture par exemple ça aurait si aussi été en contact avec l'air et le sol » « quelque chose en l'air immobile je m'en souviens plus euh euh je sais pas si y a des exemples concrets à cette situation » « tout ce qui bouge est forcément en contact avec l'air »

L'élève commence par une règle qu'elle a fabriquée : ***« fallait prendre des exemples »*** qu'elle va ensuite nuancer ***« enfin moi j'ai pris des exemples »***. Lorsqu'elle imagine son

exemple, les critères sont corrects et correspondent aux critères enseignés : « il y a forcément la force exercée par la Terre », « s'il y avait eu un mouvement il y aurait eu une force exercée par l'air », « l'objet est forcément dans les airs car il n'y a pas de force exercée par le sol ». L'élève s'imagine donc un objet immobile dans les airs et n'évoque jamais les lois de la mécanique. Cette erreur peut provenir de la difficulté de trouver un critère enseigné pour dire dans quel cas on tient compte de la force exercée par l'air et dans quel cas on la néglige devant les autres forces. Cependant, on voit ici que même si l'élève a répondu de manière incorrecte, elle exprime une compréhension de certaines règles enseignées. L'élève n'a pas su voir que cet exercice faisait appel aux lois de la mécanique.

Pour la même situation, l'entretien mené avec Sally (très bonne élève) montre à quel point le choix de la stratégie de réponse va avoir une influence :

« le mouvement il peut pas être rectiligne uniforme parce que les forces ne se compensent pas parce qu'il y a qu'une seule force et il peut l'objet il peut pas être immobile non plus parce que les forces ne se compensent pas et donc j'ai mis les deux autres euh par élimination quoi mais je savais pas trop euh en fait je savais pas trop si euh quoi si le mouvement était rectiligne non uniforme ça c- je pense que ça quoi ça peut traduire euh ce schéma là et après circulaire uniforme ça m'a posé un peu plus de problème parce que euh je sais pas RIRES je sais pas ça m'a semblé bizarre » « dans toutes les situations qu'on a étudiées y avait pas qu'une seule force en fait » « non y avait toujours la force de la terre et le sol ou quelque chose quoi » « si y avait la force de la Terre sur la Lune y avait une seule force » « j'ai mis circulaire uniforme parce que ça ça aurait pu être la Lune et ça le centre de la Terre et la Lune qui »

Quand elle voit qu'il n'y a qu'une force dans le schéma des forces, Sally pense immédiatement au fait que les forces ne se compensent pas. Elle utilise les lois de la mécanique pour éliminer les deux mouvements impossibles. Elle a du mal à trouver des exemples pour les mouvements qu'elle a choisis mais sa stratégie fait qu'elle coche les deux cases qu'elle n'a pas éliminées. C'est une des rares élèves à penser à l'exemple de la Terre et la Lune pour un mouvement circulaire avec une seule force.

On voit donc que le fait de repérer ce que l'enseignant attend dans le devoir peut avoir une grande influence sur la réponse de l'élève. Un élève qui réalise qu'il s'agit dans cet exercice d'utiliser les lois de la mécanique va immédiatement prendre en compte le critère « compensation » ou « non-compensation » des forces. On voit que Georgia ne pense pas immédiatement à utiliser les lois de la mécanique et qu'elle va chercher un exemple. Elle utilise alors d'autres règles du cours qui la conduisent à une réponse incorrecte. On voit que Sally cherche aussi des exemples mais qu'elle passe d'abord par la non-compensation des forces. Les exemples viennent seulement confirmer la réponse trouvée au moyen des lois.

Nous avons donc ici un exemple de l'importance de la représentation du problème dans la réponse de l'élève. Il s'agit de plus d'un exercice difficile où l'élève doit mettre en œuvre un raisonnement « inhabituel ». Il semble que l'écart entre les bons élèves et les élèves en difficulté soit creusé par ce type d'exercice puisqu'une « mauvaise » représentation nécessite de trouver un exemple, ce qui

est très difficile dans les situations 1 et 3. Il est particulièrement difficile de trouver une situation où il n'y a qu'une seule force.

4.3.3. Effet de classe sur les lois de la mécanique

Comme nous l'avons indiqué plus haut, les résultats concernant l'utilisation des lois de la mécanique sont très variables d'une classe à l'autre.

Tableau 11-28. Effet de classe sur la performance des élèves aux questions mettant en jeu les lois de la mécanique.

	nombre de fois où l'élève a bien utilisé la loi dans le sens mouvement □ forces		nombre de fois où l'élève a bien utilisé la loi dans le sens forces □ mouvement	
	4	3 ou plus	3	2 et plus
B	77%	100%	71%	82%
C1	59%	97%	44%	65%
C2	57%	87%	53%	80%
A1	63%	96%	41%	52%
A2	59%	91%	38%	69%
D	39%	82%	27%	54%
E2	66%	94%	57%	80%
E3	59%	93%	52%	69%
E1	56%	76%	38%	68%
L	4%	57%	35%	35%
H	21%	43%	7%	25%
I	4%	26%	37%	37%
J	10%	33%	33%	33%

Les classes H, I et J ne sont pas des classes où l'enseignant a utilisé la séquence « Outils ». Cependant, nous n'avons pas suffisamment de données pour établir un lien entre l'enseignement et les performances de l'élève.

Les classes I et L sont issues du même établissement. Il s'agit d'un établissement où la proportion de bacheliers parmi les sortants de 2^{nde}, 1^{ère} et T^{le} est très faible (42%) comparée à la moyenne de l'académie (71%). L'influence du milieu socioculturel sur les résultats des élèves ne peut être négligée. Il paraît difficile pour des classes de ce type d'attendre que la majorité des élèves maîtrise quelque chose d'aussi conceptuellement complexe que les lois de la mécanique.

4.4. Evolution des performances des élèves entre les tests 1, 2, 3 et 4

Nous présentons brièvement ici les résultats obtenus par comparaison des taux de réussite aux questions portant sur les mêmes composantes de concept d'un test à l'autre.

4.4.1. Le mouvement

Nous avons regardé l'évolution de la performance des élèves sur l'ensemble des

questions mettant en jeu la description du mouvement en termes de modèle entre les tests 1 et 4. Dans le test 1, il y a neuf questions où l'élève doit décrire le mouvement d'un objet en termes de trajectoire et de variation de vitesse (rectiligne uniforme, circulaire non uniforme, etc.). Dans le test 4, il y a quatre questions de ce type. Le Tableau 11-29 présente les effectifs correspondant au nombre de questions réussies pour chacun de ces tests.

L'avant-dernière colonne de ce tableau contient le nombre d'élèves ayant donné cinq bonnes réponses sur cinq dans le test 4. Parmi eux, seuls 14 élèves avaient donné neuf bonnes réponses sur neuf dans le test 1. On peut donc dire que tous les autres élèves figurant dans cette colonne ont progressé. Nous avons ainsi indiqué en italique les élèves ayant obtenu, par proportion, plus de bonnes réponses dans le test 4 que dans le test 3. La majorité des élèves (71 sur 93) ont donc progressé ou sont restés avec le taux de réussite maximal en ce qui concerne la description du mouvement dans les termes du modèle (trajectoire et variation de vitesse).

4.4.2. Les forces

Force exercée par la Terre

		identification de la force exercée par la Terre test 4 (sur 6)				Total
		3	4	5	6	
Identification de la force exercée par la Terre test 2 (sur 8)	4	0	0	0	<i>1</i>	1
	6	0	0	0	<i>1</i>	1
	7	0	0	0	3	3
	8	1	1	9	74	85
Total		1	1	9	79	90

Tableau 11-30. Comparaison du nombre de bonnes réponses des élèves sur les questions mettant en jeu la force exercée par la Terre entre les tests 2 et 4.

Une majorité d'élève (74 sur 90) ont systématiquement donné la bonne réponse pour toutes les questions aussi bien dans le test 2 que dans le test 4. On peut donc considérer que l'identification de la force exercée par la Terre ne pose pas de difficulté aux élèves et que cet acquis est assez stable dans le temps. Cependant, on voit que parmi les autres élèves, 11 élèves avaient systématiquement bien identifié les forces dans le test 2 et ont fait des erreurs dans le test 4. On a vu lors de l'analyse du test 4 que la situation de l'homme dans la piscine avait posé de nombreuses difficultés aux élèves.

Force exercée par un objet en contact

		identification de la force exercée par les objets en contact test 4 (sur 9)						Total
		1	5	6	7	8	9	
Identification de la force exercée par les objets en contact test 2 (sur 5)	0	0	1	0	0	0	2	3
	3	0	0	0	0	1	0	1
	4	0	0	0	0	1	1	2
	5	0	4	4	4	4	12	28
	6	1	5	5	2	6	37	56
Total		1	10	9	6	12	52	90

Tableau 11-31. Comparaison du nombre de bonnes réponses des élèves sur les questions mettant en jeu une « force de contact » entre les tests 2 et 4.

On voit dans ce tableau que, dans le cas des forces exercées par un objet en contact, 27 élèves (soulignés dans le tableau) ont eu un taux de réussite moins grand au test 4 qu'au test 2. L'enseignement ne s'accompagne donc pas nécessairement d'une progression. Il semble que le fait que beaucoup d'élèves n'aient pas indiqué la force exercée par le sol dans les différentes questions du test 4 puisse être à l'origine de cette « baisse de performance ». De plus, on peut faire l'hypothèse que le fait de demander de représenter le diagramme système interaction dans le test 2 a permis aux élèves d'identifier plus facilement les forces de contact.

4.4.3. Les lois de la mécanique

		test 4 : nombre de bonnes réponses sur le passage du mouvement à la compensation des forces (sur 4)					Total
		0	1	2	3	4	
test 3 : nombre de bonnes réponses sur le passage du mouvement à la compensation des forces (sur 4)	0	0	0	0	1	1	2
	2	1	0	1	2	1	5
	3	0	1	1	4	9	15
	4	0	0	3	19	46	68
Total		1	1	5	26	57	90

Tableau 11-32. Comparaison du nombre de bonnes réponses des élèves sur les questions mettant en jeu les lois de la mécanique (passage du mouvement aux forces) entre les tests 3 et 4.

On a calculé le nombre de bonnes réponses de la façon suivante : la réponse est considérée correcte si le lien entre la compensation des forces et le mouvement donné par l'élève est correct. Ainsi, un élève a pu donner un mouvement incorrect mais a su ensuite appliquer les lois de la mécanique.

Sur les 19 élèves qui ont répondu juste aux quatre questions du test 3 et à trois questions du test 4, 10 élèves se sont trompés à la question 2.3 (l'enfant sur le manège) et 6 élèves se sont trompés à la questions 5.2.c (la caisse se met en mouvement). Dans ces deux situations, on voit que les élèves ont dit que les forces se compensaient alors que le mouvement était circulaire uniforme ou rectiligne non uniforme. On voit donc que la difficulté des élèves réside plutôt dans les situations où le mouvement n'est ni immobile ni

rectiligne uniforme (dans ce cas, la quasi-totalité des élèves sait que les forces se compensent). On peut faire l'hypothèse que les élèves ne retiennent qu'une seule condition à la compensation des forces (la direction ou la vitesse ne varie pas) alors qu'il est nécessaire d'avoir à la fois la direction et la vitesse qui ne varient pas.

4.4.4. Conclusion

Le fait de donner 4 tests aux élèves évaluant certains points en commun permet de voir l'évolution des réponses des élèves d'un test à l'autre. Les résultats pour l'ensemble des élèves montrent qu'il n'y a pas systématiquement un progrès dans la performance des élèves au fur et à mesure de l'enseignement.

Sur les points que nous considérons comme essentiels du point de vue du savoir, voici les évolutions constatées :

- le mouvement : la majorité des élèves progresse ou conserve un taux de réussite maximal sur les questions consistant à caractériser le mouvement avec les termes du modèle ;
- les forces : l'identification de la force exercée par la Terre semble acquise de manière stable dans le temps ; l'identification de certaines forces de contact et notamment de la force exercée par le sol n'est pas acquise et semble même régresser chez certains élèves ;
- les lois de la mécanique : l'acquisition des lois permettant de passer du mouvement à une information sur la compensation des forces semble stable chez environ 2/3 des élèves. Cependant, dans le cas où on n'a ni immobilité ni mouvement rectiligne uniforme, certains élèves semblent avoir régressé en indiquant qu'un mouvement circulaire uniforme ou rectiligne non uniforme impliquait des forces qui se compensent.

Pour que l'enseignant puisse tenir compte de cette évolution, il faudrait qu'il puisse garder une trace de la performance de l'élève à chaque test pour les différents points évalués, ce qui paraît difficile. Il peut cependant mentionner à l'élève que certains points sont repris d'un test à l'autre pour que l'élève ait de lui-même une idée de sa progression. Il serait intéressant de réfléchir à des outils adaptés. Les grilles de compétences développées par le groupe SESAMES en sont un exemple. Pour chaque test, l'enseignant remet à l'élève une appréciation point par point. Même s'il ne rentre pas dans le détail du nombre de questions réussies par l'élève pour chacun de ces points, cela permet à l'élève de comparer son appréciation d'un test à l'autre pour un même point.

4.5. Conclusion sur la validation du test 4

Le nombre important d'entretiens menés et analysés pour ce test nous a permis de mettre en évidence les limites des informations fournies par un test écrit. En effet, l'analyse des entretiens nous a permis d'obtenir de nombreuses informations complémentaires. Ainsi, nous avons pu voir que certaines erreurs des élèves dans les réponses écrites pouvaient correspondre à un simple oubli ou à une mauvaise lecture de l'énoncé.

Cependant, dans la plupart des cas, l'analyse du discours oral venait là encore confirmer l'analyse faite à partir de la réponse écrite des élèves. Nous avons vu que les élèves répondaient rarement au hasard, que leurs réponses écrites étaient motivées et qu'il n'y avait pas de difficulté majeure au moment de la rédaction de leurs réponses pour exprimer leur compréhension. Nous pouvons considérer que ce test bilan est un bon outil pour un enseignant qui voudrait avoir des indications sur la compréhension de ces élèves en ce qui concerne les concepts de mouvement et de forces et les lois de la mécanique. Il est cependant important de rappeler aux enseignants les limites de l'évaluation écrite et des conclusions qu'ils peuvent tirer à partir des réponses écrites des élèves.

Chapitre 12 : Validation

Fonctionnalité

1.1. L'utilisation de nos tests dans des classes

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre « Méthodologie », le premier critère de validation est que nos tests soient utilisables dans les classes et fonctionnels pour l'enseignant.

Lorsque nous avons proposé nos tests aux enseignants A et B, ceux-ci ne nous ont pas demandé d'apporter des modifications majeures pour les faire passer dans leur(s) classe(s). Nous avons ensemble apporté quelques changements à ces tests. Nous avons tenu compte de leur expérience pour sélectionner les exercices afin que le poids des composantes dans l'évaluation respecte le poids de ceux-ci dans l'enseignement. Nous nous sommes assurés que cela n'empêchait pas l'évaluation de la cohérence et que chaque composante était évaluée plusieurs fois. Un de leur critère dans la sélection des exercices était que l'ensemble du test soit réalisable dans le temps imparti. Ils nous ont ainsi demandé de mettre deux questions du test 2 en bonus en pensant que le devoir serait un peu long pour une heure et que cela faisait beaucoup de questions sur le principe des actions réciproques (qui n'est pas au programme). Les enseignants A et B ont donc accepté de faire passer nos tests dans leur classe sans modifier la formulation ni la forme des questions. Il semble donc que l'originalité de nos tests ne soit pas un obstacle à leur utilisation en classe. On pourrait objecter à cette première validation le fait que les enseignants A et B avaient l'habitude de travailler avec nous et qu'ils étaient probablement assez ouverts et prêts à modifier leurs pratiques. Cependant, pour le test 4, treize enseignants, dont certains n'avaient jamais travaillé avec nous et n'utilisaient pas nos séquences, ont accepté de faire passer ce test dans leur(s) classe(s) sans aucune modification et en donnant une note (le Tableau 9-3 présente uniquement les données recueillies pour les neuf enseignants sélectionnés).

Malgré leur originalité, les tests que nous avons développés semblent donc pouvoir

être utilisés par des enseignants comme un devoir surveillé habituel.

Nous avons vu dans le cadre théorique et dans la partie « Production des tests » les caractéristiques d'un devoir surveillé. Il est important de vérifier que nos tests présentent ces caractéristiques.

Nous avons vu que chaque devoir surveillé avait un contenu précis, défini dans le programme de révision. A chacun de nos tests, on peut faire correspondre un programme de révision explicite et en lien avec la séquence (programme défini à partir des différents chapitres). Le programme de révision du test 1 correspond à la partie 1 de l'enseignement « Description d'un mouvement avec un modèle ». Celui du test 2 correspond à la partie 2 « Interactions et forces ». Celui des test 3 et 4 correspond aux parties 1, 2 et 3 (« Lois de la mécanique »).

Il est important de vérifier que l'énoncé est compréhensible par les élèves. En faisant réaliser ces tests par une centaine d'élèves au minimum, nous nous sommes assurés que les élèves ont pu répondre à tous les exercices. Les enseignants nous ont affirmé que les élèves n'avaient pas posé de questions relatives à des difficultés de compréhension de l'énoncé.

Pour être fonctionnel, un devoir surveillé (à fonction sommative) doit être réalisable par la quasi-totalité des élèves dans le temps imparti. Nous avons évoqué ci-dessus le rôle de l'expérience des enseignants pour faire en sorte que ces tests soient réalisables dans un temps compris entre 30 minutes et une heure (selon les tests). Dans l'ensemble des classes, la quasi-totalité des élèves a répondu dans le temps imparti.

Enfin, un devoir surveillé doit aussi permettre à l'enseignant de donner une note à l'élève, note qui participe à la moyenne du trimestre en physique. Nous n'avons pas donné de barème. Chaque enseignant était libre de construire son propre barème afin de mettre un plus grand poids aux aspects qui lui semblaient important. Tous les enseignants ont pu réaliser un barème (cf. quelques exemples en Annexes) et noter les copies. Ce point était fondamental pour la validation de la fonction sommative de nos tests comme outils d'évaluation.

Nos tests présentent donc les caractéristiques essentielles des devoirs surveillés et se sont avérés utilisables et fonctionnels pour une quinzaine d'enseignants.

On peut remarquer certaines limites à cette fonctionnalité :

- certains enseignants peuvent être réticents à la forme QCM (tous les enseignants à qui nous l'avons proposée l'ont acceptée mais il s'agit seulement de treize enseignants) ;
- nous avons choisi de faire des tests où l'élève écrivait sa réponse directement sur la feuille. Nous avons fait ce choix pour pouvoir photocopier facilement les réponses des élèves mais cela est très coûteux en photocopies pour les enseignants (deux feuilles par élève pour chaque test au lieu d'une habituellement). Il serait possible de réduire légèrement l'énoncé en demandant aux élèves de répondre sur une copie pour certaines questions. Cependant, cette forme permet un gain de temps pour l'élève, ce qui nous permet de lui poser plus de questions et réduit l'influence de la rédaction sur

le jugement de l'enseignant ;

la dernière limite est la plus importante. Nos tests ne permettent pas d'évaluer certains aspects que l'enseignant évalue habituellement. L'enseignant doit par exemple vérifier la capacité de l'élève à répondre à un problème en argumentant ses réponses, en appliquant un raisonnement structuré et en réalisant éventuellement des calculs. Nos tests ne sont donc sûrement pas suffisants pour une évaluation sommative traditionnelle.

1.2. Opinions des élèves à propos des tests

Pendant les entretiens, certains élèves nous ont dit ce qu'ils avaient pensé du devoir. Pour deux élèves de niveaux très différents (Arthur et Sally), il ressort un commentaire comparable : cette forme de devoir semble demander aux élèves plus de réflexion.

Julien, lui, nous explique qu'il trouve un avantage à ce qu'il n'y ait pas de calcul à effectuer dans ces tests :

La présence de QCM a été commentée par Claire et Louise. Pour ces deux élèves, les QCM présentent un avantage mais on voit dans leur entretien qu'il ne s'agit pas du même avantage :

Alors que pour Claire les choix proposés permettent de considérer des possibilités auxquelles elle n'aurait pas pensé, ils permettent au contraire à Louise de faire un premier tri dans toutes les réponses possibles qu'elle s'imagine, ils la guident dans le choix des éléments du cours pertinents pour répondre.

Dans l'ensemble de nos entretiens, aucun élève n'a semblé avoir été dérangé par ce type d'épreuves. Les quelques citations ci-dessus permettent de voir que certains élèves ont constaté des différences avec les formes de devoirs surveillés qu'ils avaient habituellement mais les remarques sont plutôt positives. On peut donc considérer que nos tests sont fonctionnels pour les élèves.

2. Validité des tests

Nous avons vu dans le que chaque test permettait, par l'analyse des réponses écrites des élèves, d'obtenir des informations sur l'acquisition des concepts enseignés pour l'ensemble de la classe (à condition de faire le travail de bilan sur l'ensemble des élèves). De plus, afin d'évaluer la compréhension de chaque élève, les croisements effectués sur les réponses des élèves à différentes questions portant sur une même composante de concept se sont avérés être un bon indicateur du degré de maîtrise de cette composante. La catégorisation des réponses ouvertes permet d'avoir la liste du type de réponses qu'on peut attendre des élèves et d'avoir quelques pistes pour interpréter les difficultés de compréhension qui peuvent être à l'origine d'une erreur.

Les entretiens ont confirmé pour les élèves interviewés les conclusions obtenues à partir de l'analyse de l'ensemble de leurs réponses. Nous avons vu l'importance de regarder la totalité de la copie pour avoir un maximum d'informations sur la compréhension de l'élève.

Les entretiens nous ont de plus apporté de riches informations sur la compréhension des élèves. Ces informations n'étaient pas accessibles directement à partir de leur copie. Elles viennent enrichir les réflexions sur les difficultés des élèves.

L'ensemble de ces informations sera mis à la disposition des enseignants. Nous présentons dans la partie suivante la plate forme Internet qui permettra de communiquer nos résultats aux enseignants. Il est important de noter que cette diffusion participe à la validation de nos tests puisque les informations telles que le taux de réussite, la catégorisation, les compléments apportés en entretiens sont nécessaires à l'interprétation des réponses écrites comme indicateur de la compréhension des élèves.

3. Limites de validité

Bien que nous ayons essayé de mêler différentes approches à la fois quantitatives et qualitatives, aucune procédure d'investigation ne peut permettre d'observer directement la compréhension de l'élève. Il est important de noter la limite de notre outil d'évaluation, inhérente à tout outil d'évaluation de la compréhension. Nous avons choisi de nous intéresser à la nature de certaines de ces limites.

La compréhension est toujours en lien avec d'autres éléments. Elle est par exemple liée à la représentation que l'élève se fait du problème au sens de Julo (1995) (voir Partie théorique, chapitre 1). Ces éléments ne sont pas directement visibles sur la copie mais font partie de la compréhension. Nous avons aussi vu que les conditions de toute évaluation (qu'elle soit écrite ou orale, notée ou non, etc.) vont générer des biais dans l'observation, plus ou moins importants. On ne peut jamais observer directement la compréhension de l'élève.

Nous essayons ici de « lister » les différents biais que nous avons recensés et nous les illustrons par des extraits d'entretiens. Les trois premiers points que nous abordons ici sont en lien avec cette représentation du problème. Il s'agit de la représentation que l'élève se fait du problème à partir de la lecture de l'énoncé, du rôle de ce qui a été fait en classe dans la réponse de l'élève et de l'influence des autres questions du test dans la résolution d'une question. Les deux points suivants sont plus dépendants du mode d'évaluation puisqu'il s'agit de l'influence du fait que la réponse soit publique et évaluée sur la réponse écrite de l'élève et de l'influence des conditions de passation de l'évaluation écrite.

3.1. Représentation du problème à partir de la lecture de l'énoncé

Nous reprenons encore ici les notions introduites par Julo (1995) :

« Ce qui fait la spécificité des représentations particularisées dans le cas d'un énoncé de problème c'est donc l'existence d'une tâche associée à l'objet que l'on doit se représenter mais aussi le fait que cette tâche définit un contrat particulier entre deux personnes : l'auteur de l'énoncé et celui à qui il est destiné. En effet, contrairement à un texte qui vise à expliquer quelque chose [...], l'intention n'est pas, dans un énoncé de problème, d'explicité autant que possible l'objet que l'on doit se représenter ; l'auteur a pour intention que ce qu'il énonce fasse problème »

c'est-à-dire déclenche à la fois de la compréhension (ou plus exactement de l'incertitude) chez celui à qui il le destine ».

On reprend donc ici l'idée que la compréhension se joue dès la représentation de l'énoncé. On s'intéresse plus spécifiquement à la sélection des informations dans l'énoncé, à l'interprétation que l'élève se fait du problème qui lui est posé, et au rôle du contrat dans cette représentation.

3.1.1. Sélection des informations dans l'énoncé et interprétation de la situation

Puisque l'énoncé ne donne pas de soi les informations nécessaires à la compréhension du problème, il nécessite une sélection des informations. Prenons l'exemple de l'exercice 2 du test 2 dont l'énoncé est le suivant :

Exercice 2

Une personne lance une balle verticalement.

1. Faites le schéma des forces qui s'exercent sur la balle quand la personne lance la balle. Indiquez sur le schéma le sens du mouvement de la balle.

2. Faites le schéma des forces qui s'exercent sur la balle quand la balle monte dans l'air. Indiquez sur le schéma le sens du mouvement de la balle.

Une lecture « experte » de l'énoncé comprendrait les éléments suivants : la première phrase n'est pas suffisante pour connaître le sens dans lequel est lancée la balle ; en effet, « verticalement » nous donne la direction mais pas le sens ; la lecture complète de l'énoncé et en particulier de la question 2 nous permet de savoir que la balle est lancée vers le haut.

On voit que chez Charlotte, la sélection des informations et l'interprétation de la situation est différente :

« ça m'a déjà verticalement ça donne le sens à peu près pour voir euh comment la comment on va placer le le sens de la flèche » (tdp 76) « ça sera ben verticalement donc euh (geste : segment sur la table vers elle) comme ça [...] de haut en bas enfin ça dépendra de donc la personne elle va lancer la balle en bas » (Charlotte, test 2, tdp 82 et 84)

Charlotte se contente donc de sélectionner le mot « verticalement » pour se faire une représentation de la situation. Elle imagine alors que la personne va lancer la balle vers le bas, ce qui va avoir une influence sur l'ensemble de ses réponses puisqu'elle a dès le départ une « mauvaise » interprétation de la situation.

Nous avons trouvé d'autres situations où la compréhension de certains mots figurant dans l'énoncé avaient posé des problèmes aux élèves. Par exemple, pour l'exercice 2 du test 4, Alice ne sait pas si « l'enfant debout sur le manège » est immobile :

« (lit) indiquer le mouvement euh l'enfant il était i- il était immobile ou pas (retourne la feuille et lit l'énoncé) non ils mettent qu'il est debout donc euh ah en fait debout ils se disaient pas si il était immobile ou pas debout ça » (tdp 184)

On peut imaginer que de la même manière certains élèves ont pu se demander si, dans l'exercice 1 du test 4, le manteau suspendu au porte-manteau touchait le sol. Ce type

d'incompréhension vient du sens attaché à certains mots. Il est toujours difficile de s'assurer que l'élève comprendra la situation qu'on lui propose sans trop lui donner d'informations. En effet, dans le cas de l'enfant sur le manège, préciser que l'enfant était immobile sur le manège reviendrait à donner la réponse à l'élève. Cependant, ce type d'incompréhension de l'énoncé ne permet pas à l'élève de montrer s'il a compris ou non les concepts enseignés. Pour des raisons de contrat, il est en effet difficile à l'élève de donner une réponse du type « si l'enfant est immobile alors... s'il est en mouvement alors... » même si certains élèves ont donné ce type de réponse pour le manteau suspendu :

« Si le manteau touche le sol alors le sol exerce une force sur le manteau, si le manteau ne touche pas le sol alors le sol n'exerce pas de force sur le manteau. »

L'énoncé contient parfois des informations non pertinentes pour la résolution. C'est un biais introduit volontairement par l'auteur de l'énoncé qui veut vérifier que l'élève ne « tombera pas dans le piège » et sélectionnera les informations pertinentes en accord avec le contenu enseigné. Prenons ici l'exemple de l'exercice 5 du test 2 :

Chacune des situations suivantes met en jeu deux systèmes. Pour chacune de ces situations, représentez la force exercée par le système 1 sur le système 2 et la force exercée par le système 2 sur le système 1.

Situation 1 : Ithaut, 80 kg, pousse Arnaud, 65 kg, et le fait reculer. Système 1 : Ithaut (à gauche sur le schéma). Système 2 : Arnaud (à droite sur le schéma).



■ 1 ■ 2

Il s'agit d'un exercice mettant en jeu le principe des actions réciproques. Quelle que soit la situation proposée la réponse des élèves devra toujours respecter le fait que :

$$\vec{F}_{\text{syst.1/syst.2}} = -\vec{F}_{\text{syst.2/syst.1}}$$

La situation a seulement une influence sur les caractéristiques de direction et de sens de ces flèches. Dans cet énoncé, on a donc beaucoup d'indications qui n'ont pas d'influence sur la solution. Certaines sont de simples informations de contexte : le fait qu'il s'agisse de deux garçons, les prénoms choisis. Il y a peu de risque que ces informations influencent la réponse des élèves. Il y a au contraire de réels éléments perturbateurs : la masse des personnes en jeu dans la situation peut inciter l'élève à considérer que l'élève le plus lourd exerce une force plus grande, le fait qu'un élève fasse reculer l'autre peut inciter les élèves à penser que c'est celui qui fait bouger l'autre qui exerce la force la plus grande. Ces éléments perturbateurs ont été introduits volontairement au moment de la réalisation de l'exercice et s'appuient sur les travaux sur les conceptions des élèves.

Pendant son entretien, Roland explique qu'il a cherché les indications pertinentes et qu'il a pensé que le fait qu'une des personnes fasse reculer l'autre était un élément pertinent :

« c'était assez facile euh oui donc j'ai mis la donc j'ai regardé le j'ai regardé les indications qu'on nous a données euh quand je quand j'ai vu que hm voilà quand j'ai vu que que Thibaut il pousse Arnaud et qu'il le fait et que et qu'il le fait reculer j'ai mis j'ai donc j'ai tout de suite mis que le que la force exercée par Thibaut sur Arnaud est plus grande que la force exercée par Arnaud sur Thibaut » (Roland, test 2)

On voit ici que la sélection des informations pertinentes dans l'énoncé lors de la résolution d'un problème va avoir une grande influence. Les exemples que nous avons pris indiquent que cette sélection est plus ou moins liée à la compréhension des notions. Ainsi, s'il s'agit dans le cas de Charlotte d'une simple erreur lexicale indépendante de la compréhension du concept de force, il s'agit déjà dans le cas de Roland d'une manifestation que cet élève ne maîtrise pas le principe des actions réciproques.

La compréhension de la question peut parfois être contraire à ce qui est écrit dans l'énoncé. Plusieurs élèves nous ont ainsi expliqué qu'ils avaient considéré, pour l'exercice 4 du test 4, le palet au moment où le joueur tapait dedans ou, pour l'exercice 6 du test 4, le ballon au moment où l'arbitre le lançait alors qu'il était précisé dans les deux cas dans l'énoncé qu'on s'intéressait au palet « ayant été lancé » et au ballon « une fois que l'arbitre l'a lâché ».

« mais mais là j'ai pris pendant qu'il est en train de la lancer j'ai pas pris une fois que l'arbitre l'a lâchée » (Georgia, tdp 578) « j'ai mis la force exercée euh par le joueur sur le palet mais en fait euh je suis pas sûre qu'elle y soit parce que enfin ça dépend quand c'est qu'on quand est-ce qu'on regarde » (tdp 110) « comme j'ai fait pour le contrôle [...] c'est plutôt le moment où le joueur il frappe dans le palet parce que après euh enfin je veux dire dans dans l'énoncé là c'est plutôt euh après » (tdp 120 et 122) « et ben je crois que j'ai pas trop compris l'énoncé en fait enfin j'ai compris que c'était au moment où le joueur il frappait dedans » (Anne, tdp 136)

Ce type d'erreurs peut être lié au fait que l'élève pense que si on lui parle du joueur ou de l'arbitre c'est qu'il doit tenir compte de leur action et fait alors un raccourci en imaginant que le joueur est en train de lancer le palet ou que l'arbitre est en train de lancer le ballon. Contrairement aux autres exemples où, même s'il était difficile d'en définir l'origine exacte, une mauvaise réponse de l'élève était un indicateur d'un problème de compréhension, nous sommes ici dans une situation où une mauvaise interprétation de l'énoncé empêche toute conclusion sur la compréhension de l'élève. En effet, l'objectif de cette question est de savoir si l'élève considère une force exercée à distance par la personne ayant généré le mouvement. Si l'élève pense qu'il y a encore contact alors sa réponse n'indique pas que cet élève utilise un modèle aristotélicien. Il faudrait trouver une solution à ce défaut.

Pour le dernier exemple de difficulté de représentation de la situation, nous avons choisi le cas de Roland qui soulève un point très intéressant sur la façon de concevoir l'instant où l'on représente les forces :

« ça m'a posé problème parce que quand on lance la balle ou par exemple quand on frappe dans le ballon je savais pas pas si e- si la balle était enc- encore en mouvement ou si c'était l'arrêt c'est simplement on prenait un arrêt sur image par

exemple [...] et ben que pff et ben que quand y a pas de mouvement on prend pas le le on prend pas la force de l'air enfin c'est ce qu'on nous a dit le le cours » (Roland, test 2, tdp 196)

Roland se demande donc si le fait de regarder le système à un instant donné n'est pas incompatible avec le fait que le système soit en mouvement. Cette remarque rejoint la difficulté des élèves qui considèrent dans l'activité du médecine-ball (activité présente dans la partie 2 de la séquence, cf. Annexes) le point culminant de la trajectoire d'un médecine-ball lancé verticalement vers le haut comme une phase où la vitesse serait nulle et où les forces se compenseraient. On est ici dans un cas où la représentation de la situation se mêle vraiment à la compréhension de la physique en jeu dans la modélisation de la situation.

3.1.2. L'interprétation de la question

Les problèmes de compréhension de l'énoncé peuvent aussi se situer au niveau de la compréhension de la question posée.

Cela peut provenir d'une incompréhension d'un mot ou d'une expression. Par exemple, Alice n'est pas sûre du sens de « ne varie pas » dans la question 5 de l'exercice 1 du test 4 (Un objet a un mouvement circulaire dans un référentiel terrestre. Sa direction ne varie pas.) :

« par rapport à varie pas c'est-à-dire ne change pas ils voulaient dire la question » (tdp 120)

Il est difficile d'affirmer que cette difficulté est liée à la compréhension de l'élève. Bien sûr, le contenu de l'enseignement aurait dû être un indice pour cette élève puisqu'on retrouve en particulier dans les énoncés des lois de la mécanique « la vitesse du mouvement ne varie pas ». Cependant, le verbe « varier » n'est pas directement en lien avec les concepts de mécanique.

Au contraire, c'est parfois les mots désignant des notions centrales à l'enseignement de mécanique qui posent problème. Par exemple, Georgia a des difficultés à donner du sens aux mots « direction » et « modéliser » :

« je sais pas euh je me suis demandé ouais je confonds euh (geste en arc de cercle) direction euh (geste rectiligne vers la droite) sens (...) » (tdp 50) « je vois pas comment on pouvait modéliser l'action de la Terre enfin je voyais pas » « la Terre vers le bas en fait ça veut transformant enfin ça veut dire euh là je je comprends pas trop » (tdp 534 et 538)

Georgia explique donc qu'elle confond sens et direction, ce qui lui pose un problème pour répondre à la question 5 de l'exercice 1 du test 4. De la même manière, elle ne sait pas répondre aux différentes questions de l'exercice 6 où on lui demande les caractéristiques des forces « modélisant » des actions. Elle tente de remplacer « modélisant » par « transformant ». Ce point est intéressant car il est difficile, à partir de la réponse écrite uniquement, de distinguer la réponse d'un élève qui a compris la question et qui répond (juste ou faux) de la réponse d'un élève qui n'a pas compris la question. Dans le cas de Georgia, la justification à la question f (une force vers le bas modélisant l'action de la main de l'arbitre) nous permet quand même de déceler un problème de compréhension du mot « modéliser » :

f : « la main de l'arbitre est modélisée par l'air »

Pour deux exercices (exercice 2 du tes 2 et exercice 4 du test 4), l'énoncé précisait qu'il fallait indiquer le sens du mouvement sur le schéma des forces. L'intérêt du sens du mouvement est double : il permet de voir dans quel plan l'élève a représenté les forces et il est nécessaire à l'orientation de certaines forces (frottements). Cela semble avoir posé problème à plusieurs élèves. Par exemple, Georgia, élève en difficulté, et Sally, très bonne élève, n'ont pas compris cette phrase de l'énoncé :

Nom de l'élève	Réponse écrite	Extrait de l'entretien
Georgia		« euh c'est on indiquera le sens du mouvement du je pense que (Réfléchit.) le sens du mouvement du mouvement du palet je veux pas parce que le palet il est représenté par le point il est pas représenté par une flèche » (tdp 330)
Sally		« et donc voilà et aussi y avait le la fait de de donner le sens du mouvement du palet qui me semblait bizarre [...] parce que c'est quoi c'est pas une force qu'on qu'il s'applique et on le met dans un schéma de forces en fait » (tdp 362 et 364)

On voit ici que les deux élèves n'ont pas du tout compris la raison de cette indication dans l'énoncé et l'ont simplement interprétée comme une question supplémentaire et indépendante. Elles n'ont pas vu le lien entre le sens du mouvement et la représentation des forces. La réponse écrite de Sally est malgré tout acceptable : elle a bien identifié les forces, leur a donné des caractéristiques sensées et a choisi une représentation différente (flèche épaisse) pour indiquer le sens du mouvement. Cependant le fait qu'elle ait mêlé les deux types de flèche dans son schéma laisse deviner une certaine incompréhension. Cette incompréhension est nettement plus visible chez Georgia qui n'a pas représenté de force (la force exercée par la Terre était déjà représentée dans l'énoncé) et qui a choisi une représentation non conforme à l'enseignement (double-flèche). L'extrait d'entretien confirme bien que cette élève n'a pas du tout compris la question.

On retrouve la même difficulté chez Roland lors de la réalisation de l'exercice 2 du test 2 (Représenter le schéma des forces qui s'exercent sur une balle lancée vers le haut.).

« ah je sais pas j'ai pas j'avais pas compris [...] ah moi je p- je pensais qu'il fallait mettre euh la flèche comme ça et montrer que le mouvement il il allait comme la flèche était plus grande que ça allait vers le haut » (tdp 340 et 342)

Roland pensait que, puisqu'on lui demandait d'indiquer le sens du mouvement, il fallait que la résultante des forces soit dans le sens du mouvement. Contrairement à Sally et Georgia qui n'arrivaient pas à interpréter la question, Roland en a fait une mauvaise interprétation. Cette interprétation est liée au fait que Roland pense qu'on peut deviner le sens du mouvement à partir du schéma des forces (ce qui n'est pas le cas). On voit même dans cet extrait que Roland pense que la résultante des forces doit indiquer le sens

du mouvement, ce qui est incorrect du point de vue de la physique.

3.1.3. Rôle du contrat

Dans la vie de tous les jours, lorsqu'on pose une question à quelqu'un, c'est généralement qu'on n'en connaît pas la réponse. La situation d'évaluation scolaire est en ce sens très particulière. Nous avons vu dans le cadre théorique (chapitre 1) qu'il s'agissait d'une situation où un enseignant pose à ses élèves des questions dont il connaît la réponse afin de voir si la réponse donnée par l'élève est cohérente avec la réponse correcte attendue. Il existe une spécificité supplémentaire de cette « communication » enseignant – élèves puisque chaque question correspond à une réponse correcte unique. L'ensemble de ces règles fait partie du contrat entre l'évaluateur et l'évalué. L'élève évalué sait qu'il se trouve dans une situation particulière dont il connaît certaines règles mais la gestion de ces règles varie beaucoup d'un élève à l'autre. Nous illustrons ici par quelques extraits d'entretiens les variations que nous avons observées entre élèves.

Le contrat peut influencer l'interprétation de la tâche à effectuer. Par exemple, dans le cas de l'exercice 3 du test 4, une indication de l'énoncé a volontairement été introduite pour des raisons de contrat.

1. Pour chacun des mouvements cités ci-dessous, cochez sur chaque ligne la première case si la direction varie et la deuxième case si la vitesse varie (on pourra avoir 0, 1 ou 2 cases cochées)		
mouvement rectiligne uniforme	<input type="checkbox"/> la direction varie	<input type="checkbox"/> la vitesse varie
mouvement circulaire uniforme	<input type="checkbox"/> la direction varie	<input type="checkbox"/> la vitesse varie
mouvement rectiligne non uniforme	<input type="checkbox"/> la direction varie	<input type="checkbox"/> la vitesse varie
immobilité	<input type="checkbox"/> la direction varie	<input type="checkbox"/> la vitesse varie

On a en effet indiqué dans l'énoncé « on pourra avoir 0, 1 ou 2 cases cochées ». Cette indication avait pour but premier d'indiquer aux élèves la consigne de la question et le fait que, puisque la variation de direction et la variation de vitesse sont indépendantes, on peut avoir 0, 1 ou 2 cases cochées. Cependant, comme on pouvait s'y attendre, cette indication n'est pas neutre pour les élèves. On reprend ici le cas de deux élèves : Georgia (élève faible) et Sally (très bonne élève) :

On voit dans ces deux extraits que les élèves ont été gênés de la même manière par cette indication et se sont demandées pourquoi il n'y avait pas de ligne où les deux cases étaient cochées. Leur réponse écrite montre que ce questionnement ne les a pas contraintes à cocher deux cases. On peut donc dire que la compréhension l'a emporté sur le contrat. Le complément donné par Sally est très intéressant puisque l'élève précise qu'elle aurait utilisé cette information si elle avait douté de ses réponses.

De la même manière, Sally qui n'a indiqué qu'une force dans un schéma de forces se demande pourquoi il était indiqué dans l'énoncé « représenter toutes les forces ». Voici l'explication qu'elle donne :

Elle a donc essayé de comprendre la raison pour laquelle l'auteur de l'énoncé a utilisé ces mots. Le recul que cette élève a sur la situation d'évaluation lui permet d'imaginer les stratégies de l'auteur. Nous tenons à préciser que Sally a été la seule élève

de tous les élèves interviewés à proposer une telle « méta-analyse » de l'énoncé.

Nous avons observé chez les autres élèves différentes règles parmi lesquelles :

- on ne peut pas donner la même réponse à deux situations différentes (« j'ai choisi rectiligne uniforme vu que comme j'avais dit que enfin le troisième euh c'était rectiligne non uniforme ben ça allait pas être pareil vu que les schémas ils étaient pas les mêmes donc euh voilà » (Anne, test 4, tdp 84)) ;
- on ne peut pas simplement faire référence à une réponse précédente pour justifier (« ben au départ j'avais plutôt regardé par rapport à la question précédente » « et après ben pour justifier euh je savais pas trop comment justifier donc j'ai justifié par rapport à ça en fait » (Louise, tdp 80 et 82)).

On voit donc qu'au moment de répondre, certains élèves essaient de comprendre ce que l'enseignant attend d'eux en posant cette question et quelles peuvent être les exigences des enseignants face à une réponse.

3.2. Rôle de ce qui a été fait en classe

Julo (1995) souligne l'importance des schémas de problèmes dans la résolution de problème. Il appelle schéma de problèmes les « traces laissées en mémoire par les situations rencontrées précédemment et organisées en objets structurés ayant un certain nombre de propriétés caractéristiques ». Nous avons choisi de regarder les références faites par les élèves aux différentes situations rencontrées. Nous nous sommes limités dans notre analyse aux situations rencontrées dans le cadre de la mécanique de 2^{nde}, c'est-à-dire principalement les activités faites en classe, les exercices réalisés en classe, en situation de devoir surveillé ou à la maison.

Dans le schéma synthétisant la situation de devoir surveillé pour l'enseignant et pour l'élève (p.31), nous avons indiqué la case « Idée de ce qui a été fait en classe ». En effet, un des principaux objectifs de l'évaluation scolaire est de vérifier que l'élève a compris ce qui a été fait en classe et sait appliquer ces connaissances à de nouvelles situations. Nous avons donc décidé d'élargir notre analyse à toutes les références faites par l'élève à l'ensemble des éléments du cours dont il se souvient. Aux différents exercices et activités réalisés viennent donc s'ajouter les éléments de « cours » comme les définitions, les principes.

Lorsque l'élève répond à un exercice lors d'une évaluation, il peut faire appel plus ou moins explicitement à ce qui a été fait et dit en classe. Il peut justifier sa réponse en précisant « c'est une définition du cours », « l'enseignant nous a dit de faire comme ça » ou encore « on avait fait le même exercice en cours ». Ces indications nous donnent une triple information : la connaissance que l'élève a de son cours, l'idée qu'il se fait des exigences de l'enseignant et le rôle des exercices rencontrés précédemment dans la représentation du problème.

Les comportements des élèves que nous avons interviewés sont assez variés de ce point de vue. Certains ne font jamais référence explicitement au cours pendant l'entretien. Cela ne signifie pas qu'ils n'y fassent pas référence lorsqu'ils répondent mais simplement

qu'ils n'en ont pas parlé lors de l'entretien. Nous nous intéressons seulement ici aux élèves qui ont fait directement référence à ces points.

3.2.1. Les « bons élèves »

Claire et Sally (deux très bonnes élèves) font sans cesse le lien entre les exercices du devoir et ce qu'elles ont fait en classe :

- **Référence au contenu du cours :** « depuis le début euh du chapitre on apprend que toutes les que tous les les objets ont une force euh réciproque » (Claire, tdp 48)
- **Référence aux pratiques du cours :** « dans le cours tout ce qu'on fait en fait tous les objets ça a toujours une interaction de distance avec la Terre » (Claire, tdp 88)
- **Référence à une situation traitée en cours :** « ça pff on l'avait vu euh par rapport au médecine-ball que pendant la montée ça diminue toujours la vitesse vu qu'au bout d'un moment y aura plus de vitesse elle va être nulle et ça va redescendre donc voilà » (Claire, tdp 246) « je me suis rappelée du dernier cours qu'on avait fait c'était sur euh les frottements ça s'appelait » (Claire, tdp 352) « on avait fait le même ex- le même exercice en cours » « non c'était autre chose c'était euh non c'était pareil c'était un objet lourd euh sur une table euh qu'on poussait c'était pareil » (Sally, tdp 380 et 382)
- **Référence aux exigences de l'enseignant :** « vu que la prof elle avait dit qu'il fallait toujours euh quand on posait une question comme ça fallait pas répondre selon l'intuition mais selon euh euh les forces qui se compensent » (Claire, tdp 250)
- **Absence de référence dans le cours :** « j'ai pas réussi à me m'imaginer la représentation d'un des forces d'un mouvement circulaire je me suis pas souvenue qu'on en avait fait un donc euh j'ai pas pu savoir comparer » (Claire, tdp 554) « dans toutes les situations qu'on a étudiées y avait pas qu'une seule force en fait » (Sally, tdp 236)

Julien (bon élève) fait le même type de liens (tdp 166, 238, 288, 330).

On voit donc que ces deux bonnes élèves font très souvent référence à leur cours pour répondre aux questions qu'on leur pose. Elles vont même expliquer leurs difficultés par l'absence de lien avec ce qui a été fait en classe. Cela rejoint les résultats mis en avant par Joshua et Félix (2002) : si on considère la situation de devoir surveillé comme un système didactique auxiliaire, les bons élèves importent dans ce système didactique auxiliaire le milieu construit dans le système didactique principal (la classe).

3.2.2. Les « élèves faibles »

Parmi les élèves en difficulté interviewés, la plupart ne font pas référence au cours de manière explicite. Ils répondent à l'exercice comme si c'était la première fois qu'ils avaient à traiter ce genre de questions.

Nous avons cependant interviewé une élève (Georgia) qui effectuait des liens avec son cours :

**« parce que enfin il me semble dans le cours il avait dit que quand il y a deux objets en contact forcément ils exercent une pression l'un sur l'autre » (tdp 14)
« c'est une force qui ben le sol il attire le palet vers le bas donc c'est vers le bas et puis dans les exercices qu'on a faits en physique c'est toujours vers le bas » (tdp 368) « dans les exercices y avait toujours une force vers le bas » (tdp 374)
« on a fait plein de trucs avec le pendant que la balle est en train de monter et je sais que ça augmentait donc j'ai appris mais [...] je comprenais pas pourquoi ça augmente toujours » (tdp 600 et 602)**

Toutes ces références sont des références à des « pratiques » de cours, c'est-à-dire des invariants observés par l'élève dans le cours mais pas explicités par l'enseignant. Dans le premier cas, l'élève se rappelle un élément pertinent et correct du cours pour répondre aux questions. Par contre, dans l'exemple suivant, elle attribue probablement ce que l'enseignant a dit à propos de la force exercée par la Terre à la force exercée par le sol. Dans le dernier exemple, elle pense avoir entendu quelque chose en classe (l'enseignant n'a probablement pas dit cela). Ce qui est intéressant ici est qu'elle a choisi d'appliquer cette « pratique » même si celle-ci est contraire à sa compréhension.

Nous avons noté dans l'étude préalable qu'un élève en difficulté ne faisait pas le lien avec l'exercice du cours le plus pertinent. Nous avons ici le cas de Charlotte qui fait référence à un exercice précis dans le cours mais qui n'est pas très pertinent pour répondre à l'exercice posé en devoir (dans le cas de l'exercice 4 du test 2 où les élèves devaient faire les diagrammes système interaction pour les différentes phases d'un penalty) :

« ah si c'était euh c'était c'était quoi qui m'est venu c'est les en fait c'est les interactions qui m'ont qui me sont venues direct à l'esprit je sais pas pourquoi parce que ça m'a fait penser au à une à je sais plus c'était un exercice sur quoi [...] hm qu'on avait fait en en TP je crois et euh et ouais ça m'avait fait pensé à ça [...] c'était euh c'était un motard [...] avec euh y avait l'air il était sur sa moto et il roulait » (tdp 166, 168, 170 et 172)

Parmi les activités faites en classe, l'analyse des phases du mouvement du médecine-ball nous apparaît beaucoup plus appropriée puisqu'il s'agit d'un objet lancé pour lequel on s'intéresse au moment où il est lancé, au moment où il se déplace dans les airs et au moment où il est rattrapé.

3.2.3. Conclusion

Parmi les élèves que nous avons interviewés, nous retrouvons les résultats de Félix (2001). Les bons élèves semblent essayer de faire constamment le lien entre ce qui a été fait en cours et les exercices proposés en devoir. Ils font la plupart du temps des liens pertinents qui leur permettent de répondre de manière correcte aux questions. Ces liens sont une véritable aide pour comprendre ce qui leur est demandé. Ils peuvent ainsi comprendre ce à quoi ils doivent faire appel pour répondre (une loi, un exemple, etc.).

3.3. Influence des autres questions du test

Nous avons repéré dans les entretiens des élèves deux influences du reste du devoir sur leur résolution, assez différentes l'une de l'autre. La première est la cohérence interne c'est-à-dire l'établissement de liens entre questions « semblables » pour l'élève. La deuxième est la gestion de l'ensemble du devoir pour décider de l'ordre de réalisation des différentes questions.

3.3.1. Cohérence interne

Même si le critère de cohérence est moins utilisé par les élèves en difficulté que par les « bons » élèves, on trouve des références aux autres réponses chez des élèves de niveaux variés. Ce repérage de liens entre les questions n'est la plupart du temps pas visible sur les copies alors que c'est une manifestation de la compréhension.

Arthur, élève en difficulté sur l'ensemble de ces tests, utilise parfois les réponses précédentes pour répondre. Dans le cas de l'exercice 2 du test 1, son commentaire montre qu'il utilise ses réponses à la question précédente (sur la variation de la vitesse) à pour répondre la question sur la description du mouvement :

« alors après ben pour la C la caisse A elle a un mouvement rectiligne et non uniforme comme euh sa vitesse elle augmente et euh la caisse B elle a un mouvement euh rectiligne uniforme comme euh ben comme on l'a dit tout à l'heure comme euh en ligne droite et que c'est ben la caisse A ben elle augmente et euh la caisse B euh elle garde la même vitesse au cours de du parcours » (tdp 66)

Chez les bons élèves, les liens sont plus explicites et indiquent un certain détachement du contexte de la question, d'un passage à des « objets modélisés ». Par exemple, pour la question 1.6 du test 4 où on demande aux élèves si la Terre exerce une force sur un homme qui nage dans une piscine, Sally et Claire montrent qu'elles ont compris que la nature de l'objet et la situation de l'objet (dans l'eau, dans les airs) n'avaient pas d'importance dans leurs commentaires oraux :

« ben c'est pareil quoi c'est pareil que pour l'oiseau » (Sally, tdp 104) « euh un homme nage dans une piscine donc c'est la même chose que pour euh qu'un oiseau dans les airs en fait sauf que c'est dans une piscine mais bon ça change rien » « ben non ça c'est toujours euh un objet » (Claire, tdp 100 et 102) Un autre exemple de l'entretien de Sally montre la pertinence de son analyse dans la réponse à la question : « euh ben là je viens de dire que les forces se compensent donc il faut que la somme vectorielle des forces elle soit égale à zéro » (Sally, tdp 386)

Cette élève a donc vu que le schéma des forces devait tenir compte de la compensation des forces. Cette compensation exprimée dans un premier temps en langue naturelle s'exprime ensuite dans un registre graphique. On a vu dans notre analyse des réponses que peu d'élèves ont tenu compte de cette information sur la compensation des forces lors de la réalisation du schéma des forces.

L'utilisation des autres questions résolues pour répondre à une question montre que l'élève est capable de voir des traits communs à ces questions. L'analyse des entretiens nous a montré que ce fonctionnement était plus explicité par les bons élèves.

3.3.2. Ordre de réalisation

Pour cet aspect, on observe de moins grandes différences d'un élève à l'autre. En général, les élèves répondent aux questions dans l'ordre. Ils ne lisent pas l'énoncé dans sa totalité mais répondent aux questions au fur et à mesure. La contrainte de temps fait qu'ils passent les questions plus difficiles, pour lesquelles ils ne connaissent pas la réponse.

« ben j'ai lu et puis euh vu que j'avais passé un peu du temps avant pour réfléchir euh surtout euh à ces questions là et ben j'avais plus trop le temps pour euh pour finir donc euh j'ai j'ai pas j'ai accéléré un peu donc je l'ai laissé de côté je me suis dit je reviendrais après » (Louise, tdp 160)

« j'ai regardé celles que j'arrivais bien j'ai répondu et celles que j'arrivais pas trop je les ai laissées de côté puis après » (Anne, test 4, tdp.8)

« non je lis toujours dans l'ordre et ce que je suis pas sûre je passe pour finir mon interro » « et après je reviens dessus pour euh quand j'ai le temps » (Claire, tdp.38 et 40)

Certains ont même des critères de type de questions à laisser pour la fin. Ainsi, Claire commence par cocher les cases, justifie dans un deuxième temps pour certains exercices et laisse systématiquement les schémas de forces pour la fin.

« les vecteurs je les ai faits après vu que c'était plus long » (tdp 182) « c'est vrai que je préfère faire les exercices cochés et après ce qui demande plus de temps » (tdp 198)

On voit donc que parmi les élèves interviewés, aucun n'a mis en avant des critères de regroupement des questions. On aurait en effet pu imaginer que les élèves fassent toutes les questions sur le mouvement puis toutes les questions sur les forces. Il aurait été étonnant qu'ils fonctionnent ainsi. Cependant on peut être surpris que les élèves ne fassent jamais référence à des critères de barème pour répondre en priorité à des questions qui « rapportent des points ». Leur critère essentiel semble quand même orienté vers une gestion du temps afin de faire le maximum de questions (et donc d'avoir le maximum de points ?).

3.4. Influence du fait que la réponse soit publique et évaluée

Le fait que la réponse soit publique et évaluée a déjà été un peu abordé dans ce que nous venons de dire pour le rôle du contrat dans la représentation ou le choix de l'ordre de réalisation. Nous revenons ici rapidement sur les contraintes du contrat et des exigences de l'enseignant sur la réponse ainsi que sur les raisons qui poussent un élève à écrire sa réponse ou à ne pas l'écrire (en d'autres termes à faire de sa réponses privée une réponse publique).

3.4.1. Contrat / Exigences sur la réponse

Il semble que le contrat entre l'évaluateur et l'évalué et les exigences que l'élève pense

que le correcteur aura vont influencer la façon dont l'élève va formuler sa réponse. Voici trois extraits d'entretien qui illustrent ce point :

« voilà ben c'est en fait c'est vou- ça voulait dire glace mais en fait ça je vais pas dire deux fois glace donc euh j'ai mis sol à la place » (Arthur, test 4, tdp 242)

Il s'agit plutôt ici d'une influence liée aux exigences de l'enseignant sur ce qu'est une « bonne » réponse que du contrat didactique : l'élève ne veut pas écrire deux fois le mot « glace ».

« comme dans tous les exercices on mettait toujours la force euh la force de la Terre euh vers le bas euh donc pour moi c'était logique que » (tdp 452) « ah je pensais non je pensais pas euh je me suis dit c'est pas possible de mettre ça quand même comme justification » (Anne, test 4, tdp 460) « ouais mais je savais pas vu que la prof elle avait dit qu'il fallait toujours euh quand on posait une question comme ça fallait pas répondre selon l'intuition mais selon euh euh les forces qui se compensent donc j'avais mis ça c'était l'exercice » (Claire, tdp 250)

On voit donc pour ces trois élèves un décalage entre leur première pensée et ce qu'ils ont décidé d'écrire. Ils ne donnent pas directement à voir leur réponse privée mais la modifient pour qu'elle devienne acceptable en tant que réponse publique.

3.4.2. Degré de certitude et choix d'écrire ou non sa réponse

De manière générale, les élèves écrivent parfois des réponses dont ils ne sont pas sûrs.

Georgia (élève en difficulté) énoncé une règle qu'on pourrait ainsi formuler : « il vaut mieux écrire quelque chose que de ne rien écrire même si on est pas sûr de sa réponse ».

« je sais pas enfin j'ai marqué parce que je me suis dit il vaut mieux marquer quelque chose que rien mais » (tdp 122) « à la fois fallait bien que je mette quelque chose » (tdp 172)

Cependant, elle n'a pas écrit de réponse pour la question 6 de l'exercice 1. Quand on lui demande pourquoi voilà ce qu'elle répond :

« parce que je sais pas là j'étais vraiment pas sûre » « j'avais peur de mettre quelque chose de complètement une bêtise quand même » (tdp 124 et 128)

Cela est donc en lien avec la notion de ce qui peut devenir « public ». On peut écrire une réponse dont on n'est pas sûr à condition que cette réponse nous paraisse raisonnable.

On retrouve des éléments moins explicites chez les autres élèves :

« non c'était un peu pour remplir » (Claire, tdp 300)

« j'ai mis au hasard » (Arthur, tdp 148)

On peut noter aussi une différence entre les questions ouvertes et les questions fermées. Il est en effet plus facile de donner au hasard une réponse pour une question fermée alors qu'il faut au moins avoir une idée de réponse pour les questions ouvertes. C'est par exemple le cas des justifications.

« mais je savais pas bien pourquoi c'est pour ça que j'ai pas justifié » (Louise,

tdp 94)

Enfin, pour le même type de question et pour le même élève, on voit que les conditions qui guident le choix d'écrire peuvent varier dans le temps. Par exemple, dans le cas de Roland, le fait d'indiquer ou non une force pour laquelle il hésite semble instable :

Roland choisit donc dans le premier cas de ne pas indiquer la force exercée par l'air mais choisit d'écrire les forces exercées par le joueur en plus des forces exercées sur le joueur.

On voit donc que le choix d'écrire ou non sa réponse, de la rendre publique ou de la garder privée, est le résultat d'une négociation interne prenant en compte le degré de certitude de l'élève, l'idée qu'il se fait des exigences du correcteur et d'une stratégie de gestion du risque.

3.5. Influence des conditions de passation

Nous finissons cette analyse des limites par quelques contraintes propres aux conditions de passation telles que l'influence du temps limité, de l'état de l'élève le jour du devoir, de la contrainte de la place qu'il a pour répondre.

3.5.1. Temps limité

Comme nous l'avons vu dans le choix de l'ordre de réalisation, les élèves sont conscients qu'ils ne peuvent pas prendre tout leur temps pour répondre. Nous avons vu dans les entretiens que le fait d'avoir un temps limité pour répondre les poussait parfois à se précipiter dans leur réponse, à ne pas réellement prendre le temps de réfléchir :

« RIRES là en fait j'ai voulu répondre oui au moment deux et euh et qu- oui au moment deux et au moment cinq mais en fait j'ai pas pu répondre je me suis trop précipité » (Arthur, test 1, tdp 80) « non je pense que je non mais je pense que je suis allée un peu vite et je me suis dit ben ça va RIRES » (Sally, tdp 160) « ben oui j'ai réfléchi j'ai regardé un peu tous les exercices je les ai un peu comparés euh pff bon après j'ai pas trop eu le temps parce que je suis toujours en retard sur les contrôles » (Roland, tdp 238)

Les élèves n'ont parfois pas le temps de répondre à l'ensemble des questions. C'est le cas de Louise dans le test 4 :

« enfin y avait aussi la Terre mais j- j'avais pas eu le temps de finir en fait ça avait sonné et j'ai pas eu le temps de finir » (tdp 246)

Dans cette situation, son absence de réponse n'indique pas qu'elle n'a pas compris.

Le temps limité semble donc être un facteur qui a une influence sur les réponses des élèves. On peut considérer qu'un élève qui aurait bien compris tous les éléments mis en jeu dans l'énoncé devrait être capable de répondre à toutes les questions dans le temps imparti (si le devoir est construit selon ce critère). Cependant, c'est une véritable limite à l'interprétation d'une non-réponse de l'élève.

3.5.2. Forme du jour

Un devoir surveillé permet d'obtenir la performance de l'élève à un instant donné. L'élève

peut-être malade le jour du devoir, ne pas être à cent pour cent de ses capacités. Ceci aura nécessairement une influence sur ses réponses. Claire était justement malade le jour où elle a répondu au test 4. Ses commentaires montrent que cela l'a incité à « bâcler » son devoir et à sortir plus tôt :

« encore ce l'autre interro je dis pas mais celle-là j'étais malade je dois avouer j'ai un peu répondu au pif [...] RIRES j'avais tellement mal à la tête que j'ai un peu bâclé les trucs » (tdp 8 et 10) « celle-là c'est vrai que je l'ai vraiment bâclée celle-là parce que c'était ça faisait une heure que je me concentrais c'est vrai je me souviens [...] c'est-à-dire que parce qu'en fait on a eu le droit de sortir euh à l'avance RIRES [...] donc euh vu que j'avais envie de me de me moucher donc euh [...] RIRES parce que dans la salle ça fait vilain donc euh quand il y a cinquante personnes c'est pas » (tdp 392, 396, 398, 400)

3.5.3. Contrainte de place

Nous avons choisi de demander à l'élève de répondre sur l'énoncé, ce qui impliquait qu'il avait une place limitée pour répondre. Nous avons vu que dans le cas de Sally, ceci était une véritable contrainte :

« mais je voulais quoi j'ai essayé de serrer mais euh si c'était ça que je voulais mettre c'était ça mais c'était ouais c'était pas vraiment la phrase à laquelle j'aurais pensée en premier quoi mais comme y avait pas assez de place euh j'ai dû réfléchir quoi RIRES » (tdp 506)

Sally nous a ainsi indiqué plusieurs fois que le fait de ne pas avoir assez de place l'avait fait réfléchir à la formulation de ses réponses afin de trouver une réponse convenable qui tenait dans l'espace disponible. Pour éviter cette contrainte, on pourrait préciser aux élèves qu'ils peuvent répondre sur une feuille à part s'il le souhaite. Cependant, pour des effets de contrat, les élèves continueraient probablement à penser que la place laissée correspond à la place « nécessaire » pour donner la bonne réponse.

3.5.4. Stress et note

Contrairement à ce qu'on aurait pu penser, aucun élève n'a fait explicitement mention de l'influence du stress généré par la situation ou du fait que le devoir soit noté. Cela semble difficile à expliquer mais on peut supposer que le stress n'était pas un facteur d'inhibition chez les élèves interviewés et qu'ils n'ont pas jugé nécessaire de faire référence au stress dans ce type d'entretien. Quant au fait que ce soit une évaluation notée, il serait naïf de penser que cela n'a aucune influence sur les élèves. Nous l'avons d'ailleurs vu indirectement dans leur choix de l'ordre de réalisation et dans les références aux exigences du correcteur.

Chapitre 13 : Conclusion

1. Validité des outils développés

Voici les questions que nous nous étions posées concernant la validité de nos outils d'évaluation :

4. Dans quelle mesure les outils développés s'intègrent-ils dans les pratiques d'évaluation de l'enseignant ? Comment ces outils sont-ils perçus par les élèves ? (**Fonctionnalité de l'outil**)

5. Que peut-on dire sur la compréhension par les élèves des concepts enseignés en analysant leurs réponses écrites ? Dans quelle mesure ces outils permettent-ils d'évaluer la cohérence des élèves ? Quelles sont les analyses des réponses qui permettent de caractériser des niveaux de compréhension ? (**Pertinence de l'outil**)

6. Ces outils donnent-ils des informations cohérentes avec des informations obtenues par une autre méthode d'évaluation ? (**Fiabilité de l'outil**)

1.1. Fonctionnalité de l'outil (question 4)

Nous nous sommes assurés que les tests ne demandaient pas d'adaptation particulière des pratiques d'évaluation en classe. Les enseignants qui ont utilisé nos tests (deux enseignants pour les tests 1, 2 et 3 et neuf enseignants pour le test 4) les ont utilisés de la même façon qu'un autre devoir surveillé : chaque enseignant a annoncé le programme de révision, a établi un barème et noté l'ensemble des élèves de la classe, a effectué un corrigé en classe. Nous avons vu que, même si les élèves notaient une différence sur la forme du devoir, ils n'étaient pas déstabilisés par celui-ci, comprenaient les énoncés et arrivaient à répondre dans le temps imparti.

Une des élèves interviewés a eu une réflexion nous permettant de penser que l'un de nos objectifs était atteint : selon elle, ce type de test incite l'élève à réfléchir et à ne pas réécrire bêtement son cours.

1.2. Pertinence de l'outil (question 5)

1.2.1. Résultats sur la compréhension des concepts enseignés

Nous avons dans un premier temps analysé le savoir à enseigner. Cette analyse nous a permis de repérer les différentes composantes de concepts que nous voulions évaluer. Les tableaux 5-1 à 5-4 présentent une synthèse des acquis et des difficultés des élèves d'après l'analyse des différents tests (tests 1 à 4) sur les concepts de mouvement et de force et sur les lois de la mécanique. Nous avons indiqué dans la première colonne (1) les composantes pour lesquelles le taux de réussite à une (ou deux) question(s) était supérieur à 90% ou pour lesquelles le taux de réussite sur l'ensemble des questions était supérieur à 75%. Nous avons distingué ces deux taux de réussite car la cohérence des réponses ne pouvait pas être évaluée sur toutes les composantes des concepts enseignés. Afin de remédier un peu à cela, nous avons considéré que la réussite sur une ou deux questions devait être plus élevée pour indiquer une bonne compréhension. Nous

avons indiqué dans la troisième colonne (3) les composantes pour lesquelles le taux de réussite à une (ou deux) question(s) était inférieur à 60% ou pour lesquelles le taux de réussite sur l'ensemble des questions était inférieur à 50%. La deuxième colonne (2) présente les composantes pour lesquelles le taux de réussite est intermédiaire. Il ne s'agit pas d'une catégorisation stricte mais plutôt d'une indication relative des taux de réussite aux différentes questions ou ensembles de questions. Cela nous permet de repérer, pour cet échantillon d'élèves, le niveau de difficultés des différentes composantes.

Tableau 13-1. Synthèse des acquis et des difficultés des élèves sur le concept de mouvement au moment du test 1 (N=94).

1	2	3
<p>Taux de réussite sur une ou deux questions supérieur à 90% : - Comparaison de la vitesse moyenne de deux mobiles sur l'ensemble d'un trajet (1 question : 97% de réussite) Taux de réussite sur un ensemble de questions supérieur à 75% :</p> <p>- Interprétation d'une chronophotographie en termes de variation de vitesse et de caractérisation du mouvement (4 questions : 89% de réussite)</p>	<p>Taux de réussite sur une ou deux questions compris entre 60% et 90% : - Justification complète de la comparaison de la vitesse moyenne de deux mobiles sur l'ensemble d'un trajet (1 question : 60%)</p>	<p>Taux de réussite sur un ensemble de questions inférieur à 50% : - Description de la trajectoire dans un référentiel (5 questions : 22% de réussite) - Description de la variation de vitesse dans un référentiel (5 questions : 37% de réussite) - Description du mouvement cohérente avec la variation de vitesse et la trajectoire (5 questions : 36,2%)</p>

Nous voyons donc que dans le cas du mouvement, la majorité des élèves semble avoir acquis les connaissances nécessaires à la comparaison de vitesses moyennes et à l'interprétation de chronophotographies. Cependant, lorsqu'on analyse la maîtrise des liens effectués entre les différentes composantes du concept de mouvement (principalement le lien entre mouvement d'une part et trajectoire et variation de vitesse d'autre part), on réalise que les élèves ont plus de difficultés à mettre en pratique de tels liens. De plus, on s'aperçoit que les élèves ont des difficultés à prendre en compte le référentiel pour décrire la trajectoire et la variation de vitesse (testé dans 5 situations).

Tableau 13-2. Synthèse des acquis et des difficultés des élèves sur le concept de force au moment du test 2 (N=91).

1	2	3
Taux de réussite sur un ensemble de questions supérieur à 75% : - Identification de l'interaction à distance avec la Terre (9 questions : 94,5% de réussite) - Identification de la force exercée par la Terre (8 questions : 85,7% de réussite) - Lien entre interactions et forces (croisement entre 24 questions : 80% de réussite) - Identification des interactions de contact (6 questions : 78,0% de réussite)	Taux de réussite sur un ensemble de questions compris entre 50% et 75% : - Identification des forces de contact (6 questions : 61,5% de réussite) - Identification de l'absence d'interaction dans le cas de systèmes pas en contact (7 questions : 53,8%) - Identification de l'absence de force dans le cas de systèmes pas en contact (5 questions : 67,0%)	Taux de réussite sur un ensemble de questions inférieur à 50% : Application du principe des actions réciproques dans le cas de mouvement (4 questions : 1,1% de réussite)

Au moment du test 2, il semble donc qu'une majorité d'élèves identifie systématiquement l'interaction et la force exercée par la Terre. Les résultats montrent que le lien entre interaction et force est largement maîtrisé puisque 80% des élèves répondent systématiquement de manière cohérente sur 24 couples interaction/force analysés (97,8% des élèves le font sur plus de 21 couples). Les élèves ont quelques difficultés à identifier les forces de contact et l'absence de force dans le cas de systèmes qui ne sont pas en contact. Cependant, la grande difficulté des élèves, pour ce test, se situe dans l'application du principe des actions réciproques puisque seule une élève a indiqué des forces de même intensité quelle que soit la situation.

Tableau 13-3. Synthèse des acquis et des difficultés des élèves sur les lois de la mécanique au moment du test 3 (N=90).

1	2	3
Taux de réussite sur un ensemble de questions supérieur à 75% : - Passage de la description du mouvement (situation du champ expérimental) à une information sur la compensation des forces (4 questions : 75,5% de réussite)	Taux de réussite sur une ou deux questions compris entre 60% et 90% : - Identification des forces qui s'exercent sur un système (sans donner de force « motrice ») à partir de la description de la situation du champ expérimental (1 question : 61,7% de réussite)	Taux de réussite sur une ou deux questions inférieur à 60% : - Choix de la loi de la mécanique permettant de passer d'une information sur la compensation des forces à une information sur le mouvement (1 question : 40% de réussite) - Application du principe des actions réciproques dans le cas d'un mouvement autre que rectiligne uniforme (2 questions : 47,7% de réussite)

On voit qu'au moment du test 3, l'application du principe des actions réciproques pose moins de problèmes aux élèves (même s'il reste un élément du modèle faiblement maîtrisé) puisque 47,7% des élèves indiquent systématiquement des forces de même intensité, même dans le cas d'un mouvement rectiligne non uniforme ou circulaire uniforme (situations les moins bien réussies). On observe que le taux de réussite est assez élevé pour le passage du mouvement aux forces (conformément aux lois de la mécanique) puisque 75,5% des élèves ont réussi ce passage systématiquement sur les quatre questions posées.

	1	2	3
Mouvement	Taux de réussite sur une ou deux questions supérieur à 90% : - Description d'un mouvement avec les termes du modèle dans le cas de l'immobilité ou du mouvement rectiligne uniforme (2 questions : 93,9%) Taux de réussite sur un ensemble de questions supérieur à 75% : - Lien entre uniforme/non uniforme et variation de vitesse (3 questions : 94,5% de réussite) Taux de réussite sur un ensemble de questions supérieur à 75% : - Identification de la force exercée par la Terre (3 questions : 78,7% de réussite)	Taux de réussite sur une ou deux questions compris entre 60% et 90% : - Description d'un mouvement avec les termes du modèle dans le cas des mouvements circulaire uniforme ou rectiligne non uniforme (2 questions : 63,7%) - Lien entre mise en mouvement et variation de vitesse (2 questions : 56,2% de réussite)	Taux de réussite sur une ou deux questions inférieur à 60% : - Lien entre mouvement circulaire et variation de direction (2 questions : 33,5% MAIS différence importante entre les deux questions – l'une d'elles est réussie à 83,0%)
		Taux de réussite sur un ensemble de questions compris entre 50% et 74% : - Identification d'une force de contact (autre que celle exercée par la sol) (4 questions : 73,4% de réussite) - Identification de la force exercée par la sol (4 questions : 61,5% de réussite) - Identification de la liste des forces s'exerçant sur un système (3 questions : 50,5% de réussite)	Taux de réussite sur une ou deux questions inférieur à 60% : - Identification de l'absence de force dans le cas de systèmes pas en contact (2 questions : 23,0%) Taux de réussite sur un ensemble de questions inférieur à 50% : - Représentation du schéma des forces sans tenir compte de la compensation des forces (3 questions : 27,0% de réussite) Taux de réussite sur un ensemble de questions inférieur à 50% : - Passage de la description d'une situation du champ expérimental à une information sur la compensation des forces (4 questions : 45,9% de réussite) - Passage d'une information sur la compensation des forces à la description du mouvement (3 questions : 46,8% de réussite) - Représentation du schéma des forces en tenant compte de la compensation des forces (3 questions : 47,7% de réussite)
Forces			
Lois de la mécanique			

Tableau 13-4. Synthèse des acquis et des difficultés des élèves sur les concepts de mouvement et de force et sur les lois de la mécanique au moment du test 4 (N=394)

Pour le test 4, il faut tout d'abord rappeler que l'échantillon d'élèves n'est plus le même que dans le cas des trois tests précédents et que nous avons observé des écarts parfois importants selon les classes. Cependant, sur l'ensemble des élèves, on note que les descriptions des mouvements les plus usitées (immobilité et mouvement rectiligne

uniforme, qui sont présents dans les lois de la mécanique) ainsi que l'identification de la force exercée par la Terre semblent être acquises. On remarque la difficulté des élèves à représenter un schéma des forces, et particulièrement à représenter la compensation des forces. Les lois de la mécanique représentent aussi une difficulté pour un grand nombre d'élèves.

1.2.2. Mesure de la cohérence

Les tableaux 5-1 à 5-4 nous permettent aussi de voir dans quelle mesure nos tests permettent d'évaluer la cohérence des réponses des élèves sur les différentes composantes des concepts enseignés (question 5). Nous avons déjà pu identifier ces composantes lors de l'analyse a priori mais nos résultats permettent de confirmer que cette cohérence est un indicateur de la compréhension.

Le **test 1** permet ainsi de tester la cohérence des élèves pour les composantes suivantes :

- description de la trajectoire dans différents référentiels ;
- description de la variation de vitesse dans différents référentiels ;
- description du mouvement dans différents référentiels ;
- interprétation d'une chronophotographie ;
- lien entre mouvement, trajectoire et variation de vitesse.

Ce test ne nous permet pas de tester la cohérence sur d'autres aspects de ces composantes, qui ne sont évalués qu'une ou deux fois :

- comparaison de la vitesse moyenne de deux mobiles sur l'ensemble d'un trajet ;
- utilisation de la définition de la vitesse pour justifier la comparaison de deux vitesses ;
- choix d'un point représentant un objet (de plus la question ne s'est pas avérée très pertinente pour évaluer cette composante).

Il pourrait être intéressant de rajouter des questions sur ces points.

La quasi-totalité des composantes évaluées dans le **test 2** le sont plusieurs fois. Ce test permet ainsi de mesurer la cohérence des réponses des élèves pour toutes les composantes suivantes :

- identification des systèmes en interaction avec un système donnée (système Terre, systèmes en contact, pas d'interaction avec les systèmes qui ne sont pas en contact) ;
- identification des différentes forces s'appliquant sur un système (force exercée par la Terre, force de contact, absence de force si pas de contact) ;
- lien entre interaction et forces ;
- application du principe des actions réciproques.

Pour le **test 3**, les cohérences sont évaluées pour les points suivants :

- passage d'une description d'une situation du champ expérimental à une information sur la compensation des forces ;
- application du principe des actions réciproques.
- Par contre, pour le passage d'une information sur les forces à une information sur le mouvement, ce test ne comprend qu'une question.

Enfin, pour le **test 4**, on peut considérer que les cohérences des réponses des élèves sont évaluées pour les composantes suivantes :

Mouvement :

- lien entre mouvement uniforme (ou non uniforme) et variation de vitesse ;
- description du mouvement avec les termes du modèle dans le référentiel terrestre ;

Forces :

- identification de la force exercée par la Terre sur un système donné ;
- identification de la force exercée par un système en contact avec un système donné ;
- représentation du schéma des forces qui s'exercent sur un système (caractéristiques des différentes forces) ;

Lois de la mécanique :

- passage de la description du mouvement avec les termes du modèle à une information sur la compensation des forces ;
- passage du schéma des forces qui s'exercent sur un système (et donc de la compensation des forces) à une information sur le mouvement de ce système ;
- représentation des schémas des forces qui s'exercent sur un système en tenant compte de la compensation des forces.

Il paraît utile d'ajouter des questions pour les deux aspects suivants :

- lien entre mouvement circulaire et variation de direction (évalué deux fois) : en effet les performances des élèves sur les deux questions sont trop différentes et ne nous permettent pas de caractériser leur compréhension ;
- identification de l'absence de forces dans le cas de deux systèmes qui ne sont pas en contact (idée de force motrice, évaluée deux fois) : nous avons constaté (dans les entretiens) que les « mauvaises réponses » des élèves sur les questions relatives à la force motrice pouvaient provenir d'une mauvaise compréhension de l'énoncé. Il serait donc nécessaire d'avoir d'autres questions, plus explicites, pour vérifier que lorsque l'élève sait qu'il n'y a pas contact, il représente ou identifie une force « à distance ».

1.2.3. Caractérisation des différents niveaux de compréhension

Nous pouvons enfin dire que l'analyse des cohérences des élèves nous permet de

caractériser différents niveaux de compréhension des élèves. Des travaux (Chi et al., 1981 ; Reif, 1987 ; Finegold and Gorsky, 1991 ; Song et Black, 1993 ; Palmer, 1994, 1998 ; Mildenhall et Williams, 2001) ont montré que les performances des élèves étaient liées aux caractéristiques de la situation proposée dans l'exercice. Nous avons effectivement observé que les réponses des élèves n'étaient pas cohérentes (du point de vue de l'observateur) pour certaines questions qui testaient à priori les mêmes composantes. A partir de l'étude de la cohérence des réponses des élèves à un ensemble de questions relatives à une composante, on peut inférer que l'élève a plus ou moins bien compris cette composante en utilisant la règle suivante :

- si un élève a répondu correctement de manière cohérente à toutes les questions relatives à une composante, cela peut laisser penser qu'il maîtrise suffisamment cette composante pour l'appliquer correctement dans d'autres situations (même si certaines situations peuvent l'inciter à appliquer un autre modèle) ;
- au contraire, des réponses cohérentes mais incorrectes à l'ensemble des questions permettent de déduire que l'élève ne maîtrise pas la composante ;
- enfin, des réponses incohérentes sont un indicateur que l'élève utilise plusieurs modèles pour répondre. Il est alors nécessaire de regarder plus précisément le lien entre les caractéristiques de la situation et le modèle utilisé par l'élève.

L'analyse des entretiens que nous avons menés a confirmé les déductions faites à partir de l'analyse des cohérences des réponses écrites des élèves. Il semble donc que l'étude des cohérences soit un moyen d'accéder au niveau de compréhension des concepts. Nous avons ici vérifié que l'une des bases de construction de notre test était un véritable outil pour accéder à la compréhension des élèves.

1.3. Fiabilité de l'outil (question 6)

- En vérifiant que les résultats obtenus par l'analyse des réponses écrites étaient confirmés par l'analyse des réponses orales, nous avons répondu à la **question 6**. Nous avons des résultats similaires à ceux obtenus par Halloun et Hestenes pour le FCI (qui avaient utilisé l'entretien comme une méthode de validation). Il ne s'agit bien sûr que d'un nombre limité d'élèves puisque 24 élèves ont été interviewés sur les 4 tests (dont 12 élèves dont les interviews ont fait l'objet d'une analyse détaillée) mais nous n'avons quasiment jamais observé de résultats contradictoires entre les deux sources d'informations. L'entretien donnait systématiquement des informations supplémentaires, notamment sur le degré de certitude de l'élève face à ses réponses, mais nous avons vu qu'une analyse de l'ensemble de la copie et des cohérences permettait de compléter en partie l'information sur la compréhension de l'élève.

2. Comportement des élèves en situation de devoir surveillé

- Nous rappelons ici les six questions de recherche relatives au comportement des

élèves en situation de devoir surveillé :

- | | |
|--|----|
| Quelles sont les difficultés des élèves liées à la représentation des exercices composant les tests ? Quelles peuvent être les différentes origines de ces difficultés ? | 1. |
| Dans quelle mesure le contrat semble-t-il influencer les réponses des élèves ? | 2. |
| Quel est le rôle de ce qui a été fait en classe dans les stratégies de réponses des élèves ? | 3. |
| Quelle est l'influence des autres questions composant le test ? | 4. |
| Comment l'élève choisit-il de rendre son travail public ? | 5. |
| Quelles sont les influences des conditions de passation du test ? | 6. |

Pour répondre à l'ensemble de ces questions, une analyse des entretiens a été menée. Il s'agissait d'entretiens inspirés de la méthode d'entretien d'explicitation où l'élève était invité à évoquer son action au moment de la réponse écrite au test. L'élève disposait de l'énoncé et de sa réponse écrite pour faciliter l'évocation.

Nous avons observé entre les élèves des différences de représentation (réponse à la **question 7**). Celles-ci étaient d'origines variées. Nous avons vu que les difficultés pouvaient se manifester lors de la sélection dans l'énoncé, de l'interprétation de la situation ou de l'interprétation de la question.

Voici une liste de quelques difficultés observées :

- « mauvaise » lecture de l'énoncé (par exemple considérer que le joueur est en train de taper dans le palet alors que l'énoncé dit « un palet ayant été lancé ») ;
- incompréhension d'un mot dans l'énoncé (plus ou moins lié à l'enseignement), ambiguïté sur la signification d'un mot dans l'énoncé ou erreur dans l'interprétation des termes de l'énoncé ;
- utilisation d'informations non pertinentes dans l'énoncé ;
- difficulté à s'imaginer la situation.

Entre autres, nous avons vu que le fait de faire le lien entre l'exercice auquel l'élève doit répondre et un exercice résolu en classe dont la structure « profonde » était similaire était une aide pour l'élève (**questions 7 et 9**). Au contraire, si l'élève se concentre sur les traits de surface pour faire appel à un exercice résolu en classe, l'écart de stratégie pour répondre aux deux exercices peut être la cause d'une difficulté.

L'analyse des entretiens nous a aussi permis de voir que, même si le contrat donnait des directions dans la façon dont l'élève répondait, il n'était qu'un moyen de « vérification », qu'il ne l'emportait pas sur la compréhension (réponse à la **question 8**). Les élèves semblent l'utiliser en cas de doute. Il a par contre une influence plus importante sur le choix de formulation de la réponse et du type de justification (les exigences de l'enseignant sont imaginées par l'élève au moment de répondre).

Nous avons vu qu'il existait de grandes différences entre les élèves sur la façon de faire appel à ce qui avait été fait en classe au moment de répondre (**question 9**). Certains

élèves y faisaient constamment référence pendant l'entretien alors que d'autres ne l'ont jamais évoqué explicitement. Nous avons vu que pour les élèves qui faisaient référence à ce qui avait été fait en classe, plusieurs types de références étaient utilisés :

- le contenu du cours ;
- les « pratiques » du cours ;
- une situation traitée en cours (dans une activité ou un exercice) ;
- les exigences de l'enseignant ;
- l'absence de référence dans le cours.

Il semble que les « bons » élèves fassent plus facilement des liens avec ce qu'ils ont fait en classe (nous retrouvons le même type de résultat que Johsua et Félix (2002) sur le travail à la maison). Les élèves en difficulté que nous avons interviewés font parfois référence à ce qui a été fait en classe mais souvent sous forme d'interprétation d'invariants, c'est-à-dire qu'ils généralisent de manière abusive certains points vus en classe et en font des règles. Des erreurs de compréhension au moment de la constitution de ces invariants (pendant la classe) sont alors l'origine d'erreurs dans les réponses (car le souvenir de ce qui a été fait en classe fait autorité pour ces élèves, même s'il est contraire à leur « bon sens »).

Nous avons aussi regardé comment les élèves utilisaient le reste du devoir surveillé (**question 10**). Nous avons distingué deux types d'influences :

- la cohérence interne : il s'agit de la volonté que les réponses aux différentes questions posées soient cohérentes entre elles. C'est un moyen de vérification pour l'élève. Sur l'échantillon observé, il semblait plutôt utilisé par les « bons » élèves ;
- l'ordre de réalisation : les élèves savent qu'ils auront à répondre à d'autres questions et vont « sauter » certaines questions (difficiles) afin de répondre à un maximum de questions.

Dans la situation de devoir surveillé, l'élève doit rendre une réponse, une trace publique (**question 11**). Le passage de son travail privé à la rédaction de cette composante publique semble à la fois lié aux exigences de l'enseignant « imaginées » par l'élève (qui vont influencer le choix de la formulation, du type de justification) et au degré de certitude de l'élève face à sa réponse. Cependant, pour ce dernier, si une forte certitude mène presque systématiquement à l'écriture, une faible certitude pourra mener à une non-écriture ou à une réponse « au hasard » (dans le cas des cases à cocher) en suivant la règle « il vaut mieux écrire quelque chose que rien du tout ».

Enfin, les entretiens nous ont permis d'avoir quelques éléments sur les influences des conditions de passation sur la réponse des élèves (**question 12**). L'influence la plus souvent manifestée est le fait d'avoir à répondre en temps limité : l'élève met en œuvre des stratégies pour produire le maximum de réponses dans ce temps imparti mais il peut ne pas avoir le temps de répondre à certaines questions ou se précipiter pour répondre à d'autres. Quelques élèves interviewés ont aussi mentionné la contrainte de la place laissée sur la feuille pour répondre aux questions ouvertes. Il s'agit bien évidemment ici

d'une contrainte propre au type de devoir que nous avons choisi (réponse sur la feuille). Les élèves ont tendance à « adapter » leur réponse à la place laissée en pensant que celle-ci correspond à la taille de la réponse attendue (effet de contrat, **question 8**). Une des élèves interviewés avait été malade le jour du devoir. Nous avons vu que cela pouvait générer un manque de concentration et inciter l'élève à se dépêcher pour sortir plus tôt. Enfin, nous avons été étonnés de n'avoir aucune remarque explicite sur l'influence de la note et du stress généré par la situation.

Il est donc difficile de répondre séparément à ces questions même si on peut distinguer différents phénomènes dans le comportement de l'élève en situation de devoir surveillé. Il semble qu'à chaque instant se mêlent différentes contraintes (contrat, temps, présence d'autres questions, rendu d'une trace publique) qui vont influencer à la fois la représentation et le choix de la formulation de la réponse écrite. Cependant, le travail d'analyse effectué sur ces quelques entretiens permet d'avoir des pistes pour une analyse plus profonde de l'influence de la situation de devoir surveillé sur les réponses de l'élève, et donc sur les indicateurs de sa compréhension.

Partie 4 Diffusion des outils pour les enseignants : PEGASE

Nous présentons dans cette partie la façon dont nous avons diffusé aux enseignants les différents outils développés. Il ne s'agit pas d'une réponse à une question de recherche. Cependant, notre travail n'a de sens que s'il est utile et utilisé par les enseignants et il est donc nécessaire de trouver un moyen pour que les enseignants puissent avoir accès à nos outils.

Après avoir présenté nos objectifs de diffusion (chapitre 14), nous introduisons le site Internet PEGASE (chapitre 15), déjà utilisé pour la diffusion de travaux d'ingénierie didactique par l'équipe COAST. Nous avons choisi d'utiliser ce site pour diffuser nos outils et présentons dans le chapitre 16 un exemple de diffusion, afin d'illustrer la façon dont nous avons découpé et introduit les différents résultats que nous avons obtenus.

Chapitre 14 : Notre objectif de diffusion

1. Les attentes des enseignants et la nécessité d'adapter nos résultats

Les enseignants qui utilisaient la séquence de mécanique avaient souhaité des exercices d'évaluation en accord avec cette séquence. Il s'agit donc dans un premier temps de mettre à leur disposition les énoncés des exercices que nous avons conçus. Nous pensons que les résultats que nous avons obtenus sur ces exercices présentent aussi un intérêt pour les enseignants. Notre objectif, comme nous l'avons déjà indiqué, est de produire des outils fonctionnels pour les enseignants en utilisant les résultats de la recherche. La diffusion de nos outils demande une réflexion préalable pour comprendre les attentes des enseignants. Elle nécessite une transformation des résultats que nous avons obtenus afin de fournir aux enseignants des commentaires associés aux exercices qui soient accessibles et compréhensibles.

Fossati (1996) indique que certains enseignants émettent des doutes, des craintes sur leur capacité à évaluer justement et correctement leurs élèves. Ils sont prêts à recevoir des informations nouvelles pour changer leur pratique (p.45). Fossati a fait l'expérience suivante : il a distribué à un groupe d'enseignants le texte d'un devoir donné à des élèves ainsi que deux copies d'élèves corrigées. Il leur a ensuite demandé pourquoi l'enseignant avait été gêné au moment de la correction. La principale raison donnée par les enseignants est la suivante : « l'évaluation pose problème car on ne sait pas ce qu'on évalue ». Les enseignants ont souligné différentes origines de ce problème : les objectifs d'évaluation ne sont pas clairement définis, les moments d'évaluation sont mal choisis et le niveau de difficulté des exercices n'est pas bien maîtrisé. Il est donc important de tenir compte de ces attentes dans la diffusion de nos résultats.

Cardinet (1988) cite quelques méthodes observées chez des enseignants qui peuvent nous aider à construire des outils adaptés :

« Certains maîtres prennent note des réponses des élèves de façon plus générale, en cherchant surtout à analyser les erreurs qui apparaissent le plus fréquemment. Ils pensent utile d'établir pour eux un inventaire des confusions typiques des élèves. Ils ont ainsi la possibilité de prévenir certaines fautes classiques en en avertissant d'avance toute la classe. Ils peuvent affiner la capacité de discrimination des élèves en introduisant dans les exercices les pièges à éviter : cela leur donne l'occasion de redresser très vite les confusions les plus fréquentes. Ils peuvent ainsi mieux interpréter les erreurs qui subsistent. Ils ont enfin la possibilité de préparer d'avance des exercices correctifs. » (p.223)

Il paraît donc intéressant de donner à l'enseignant pour chaque exercice les erreurs qui apparaissent le plus fréquemment ainsi que des pistes pour interpréter ces erreurs. Les travaux sur les conceptions et les extraits d'entretien associés à une réponse écrite peuvent être utilisés.

Nous pouvons enfin nous inspirer du travail de Rump et al. (2002) :

« The results from the tests and the questionnaires were summarised in a comprehensive report to the teachers. The reports show statements of both correct and unsatisfactory replies, descriptions of typical types of reply, typical mistakes and misunderstanding summaries of used time and study strategy [...]. Selected interview sequences were used to illustrate how the students reasoned about the test questions. »

Les résultats que nous avons sont similaires à ceux de ces auteurs. Ils nécessitent bien

sûr une adaptation mais devraient constituer une source d'informations pour aider l'enseignant dans l'évaluation de ses élèves.

2. Ce que nous voulons fournir aux enseignants

Comme nous l'avons indiqué, nous voulons donner, dans un premier temps, un ensemble d'exercices d'évaluation aux enseignants. Chaque exercice peut-être utilisé indépendamment mais il est important de montrer que certains d'entre eux sont particulièrement adaptés à une utilisation conjointe dans le cas d'une évaluation afin de tester la cohérence des réponses des élèves.

Nous voulons fournir aux enseignants des outils pour mieux gérer à la fois les fonctions sommative et formative de l'évaluation :

- pour la fonction sommative, il s'agit de fournir aux enseignants des exercices dont la validité a été testée ainsi que des statistiques sur les performances d'élèves à ces exercices afin de mieux situer leurs élèves. Il s'agit aussi d'accompagner les exercices de commentaires variés (explicitation des objectifs, concepts mis en jeu...) ;
- pour la fonction formative, il s'agit de fournir aux enseignants des outils pour repérer les points compris par leurs élèves et mieux comprendre leurs difficultés à partir de leurs réponses.

L'analyse *a priori* des exercices peut fournir des informations pour aider les enseignants. Cette analyse nous a permis d'identifier les objectifs d'évaluation pour les différentes questions. Il nous paraît utile d'associer à chaque question l'objectif précis, la « compétence » évaluée, formulée de telle manière qu'elle soit compréhensible par l'enseignant et qu'elle s'inscrive dans la logique du programme et de l'enseignement. L'analyse des savoirs en jeu que nous avons faite éclaire l'intérêt de l'exercice dans l'évaluation de la compréhension des concepts de mécanique. On peut ainsi informer l'enseignant des composantes de concepts qui devront être utilisées par les élèves, du type de raisonnement attendu par l'élève, du type de conception qui peut mener à une réponse incorrecte. Pour les « tests », c'est-à-dire les ensembles d'exercices à donner en devoir surveillé, nous pouvons aussi indiquer le moment qui nous semble le plus approprié pour sa passation dans la séquence.

L'analyse effective des réponses des élèves donne d'autres informations tout aussi précieuses. Il nous paraît par exemple intéressant d'indiquer le taux de réussite aux différentes questions afin de donner une indication sur la difficulté de ces questions. Le taux de réussite obtenu par d'autres élèves pour chaque exercice peut constituer une référence qui permet à l'enseignant de repérer le niveau de sa classe par rapport à un niveau « général » d'élèves du même niveau scolaire (dans notre cas la classe de Seconde). Il est aussi important d'indiquer les principales « erreurs » que nous avons repérées dans les copies et le nombre d'élèves ayant commis ces « erreurs ».

Afin que l'enseignant puisse comprendre le type de raisonnement sous-jacent à ces erreurs, nous pouvons lui donner quelques pistes d'interprétation, en tenant compte des travaux sur les conceptions et des réponses des élèves que nous avons interviewés. Le

fait de fournir à l'enseignant des exemples concrets de réponses écrites d'élèves accompagnées des extraits d'entretien correspondant peut aider l'enseignant non seulement à comprendre le raisonnement de l'élève mais aussi à prendre conscience de certaines limites de l'évaluation écrite.

La diffusion de tous ces outils va se faire par le biais d'un site Internet déjà existant que nous allons compléter. Nous présentons ce site dans le chapitre suivant.

Chapitre 15 : Présentation de PEGASE

Depuis 2001, un projet d'application Web multimédia a été mis en place afin de diffuser les résultats de la recherche en didactique des sciences aux enseignants de collège et lycée. Il s'agit du site Internet PEGASE (pour les **P**rofesseurs et leurs **E**lèves : un **G**uide pour l'**A**pprentissage des **S**ciences et leur **E**nseignement). Trois pays participent à ce projet : la Belgique, la France et le Maroc.



Figure 3. Page d'accueil du site PEGASE (<http://pegase.inrp.fr>)

Ce site a été conçu par quatre équipes de didactiques des sciences en collaboration avec des enseignants (cf. Figure 3). Les partenaires sont ainsi :

- l'Ecole Normale Supérieure de Fès (Maroc) : TICFSP
- l'Ecole Normale Supérieure de Marrakech (Maroc) : GIREST

- le Laboratoire de pédagogie des sciences - l'UCL (Belgique)
- ICAR Coast - Université Lumière Lyon 2 (France)

Ce projet a été monté avec le soutien du Fonds francophone des Inforoutes, de l'Université Claude Bernard Lyon 1 (France) et de l'Université Lumière Lyon 2 (France). L'application Web est désormais hébergée sur un serveur de l'Institut National de Recherche Pédagogique (INRP, Lyon, France) à l'adresse suivante : <http://pegase.inrp.fr>. Depuis janvier 2004, Sophie Bazin, ingénieur à l'INRP, est en charge du développement et de l'administration informatiques du site PEGASE.

L'objectif de ce site est de fournir aux enseignants des séquences d'enseignement correspondant aux programmes des différents pays et d'associer au texte de ces séquences différentes informations telles que :

- les explications des choix faits lors de la construction des séquences ;
- des aides à la préparation de ces séquences ;
- des aides au bon déroulement de l'enseignement en donnant en particulier des informations sur les comportements observés d'élèves pendant cet enseignement.

Il s'agit donc de fournir aux enseignants des outils concrets, commentés par des éléments issus de travaux de recherches, et illustrés par des observations de classes en train d'utiliser ces outils.

Le site Internet PEGASE s'adresse en premier lieu aux enseignants de collège et lycée dans le domaine des sciences expérimentales (biologie, chimie, géologie, physique, et domaines associés) mais peut aussi être utilisé par les formateurs d'enseignants. L'application Web permet notamment de générer des CD-Rom, à l'image du site Internet, qui peuvent être utilisés lors de formation d'enseignants (initiale ou continue).

L'utilisateur accède aux informations par trois entrées : **enseigner, se former, boîte à Outils** (cf. Figure 4). Les séquences et les documents associés sont présentés dans la rubrique « Enseigner ». Nous allons revenir en détail sur cette rubrique puisque c'est elle qui nous intéresse ici. La rubrique « Se former » comporte des activités de formation en lien avec les séquences qui visent à permettre à l'enseignant de comprendre les choix didactiques sous-jacents à l'élaboration des séquences, ainsi que les raisonnements et les comportements des élèves. La rubrique « Boîte à outils » comporte des fiches ressources développant certains concepts didactiques et des textes écrits par des enseignants pointant les difficultés des élèves relatives aux types d'activités proposées. Ces deux rubriques pourront bien sûr à l'avenir proposer des documents de travail sur l'évaluation mais nous nous intéressons ici seulement à la diffusion des exercices et des commentaires et résultats associés.



Figure 4. Page de PEGASE Permettant d'accéder aux trois « rubriques » : Enseigner, Se Former, Boîte à outils.

La rubrique « Enseigner » est centrale puisque les unités d'enseignement qu'elles comportent servent de base aux deux autres rubriques. Elles y font l'objet d'activités de formation et de textes plus généraux. La rubrique « Enseigner » présente une structure hiérarchique. Les différentes unités d'enseignements sont des thèmes parmi lesquels on trouve : « De l'espèce chimique à la molécule » ; « L'étude des gaz » ; « Relations, structure-propriétés de la matière » ; « Transformation chimique et avancement ». Pour le moment (puisque ce site est régulièrement alimenté), le seul thème correspondant à un enseignement de mécanique est celui qui a été l'objet de notre étude : « L'Univers en mouvement et le temps ». Il correspond au programme de mécanique en classe de 2^{nde} en France. Les activités présentées correspondent aux activités de la séquence de mécanique développée par le groupe Outils et présentée en Annexes.

Cette séquence a été expérimentée par de nombreux enseignants depuis sa création et a fait l'objet de différents travaux de recherche (Kuçukozer, 2000 ; Coulaud, 2001 ; Toix, 2004). Ces expérimentations ont permis entre autres d'observer les situations de classes et de fournir ainsi des vidéos d'élèves.

Voici la structure hiérarchique du site pour le thème qui nous intéresse :

- trois **RUBRIQUES** : « Enseigner », « Se former », « Boîte à Outils » ;
- dans la rubrique « Enseigner », plusieurs **THÈMES** (correspondant aux séquences d'enseignement) dont « L'Univers en mouvement et le temps » ;
- dans ce thème, cinq **PARTIES** (correspondant aux « chapitres » de la séquence) ;

- dans chacune de ces parties des **ACTIVITÉS** d'enseignement.

Pour chacune de ces activités, le texte de l'énoncé est disponible et constitue la page principale de l'activité (appelée page de « description »). Sur cette page, des liens permettent d'avoir accès aux informations associées. Il existe cinq types de boutons de lien : « But », « Préparation », « Savoir », « Corrigé » et « Comportement des élèves ». Le Tableau 15-1 présente les informations relatives à ces différents boutons de lien.






 But	<p>Ce lien permet d'accéder à une fenêtre où sont explicités les choix faits lors du développement de l'activité. Sont notamment exposées les raisons qui ont poussé les concepteurs à choisir tel ou tel point de savoir. Ces raisons sont liées entre autres aux difficultés des élèves en relation avec le savoir à enseigner.</p>
 Préparation	<p>La fenêtre comporte un ou plusieurs des éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériel, expérience, mesures - Déroulement de l'activité - Exigences concernant le compte-rendu - Conclusion de l'activité
 Savoir	<p>La fenêtre propose des informations qui portent d'une part sur le savoir scientifique et d'autre part sur les points pour lesquels les enseignants doivent être particulièrement vigilants quand ils s'adressent à leurs élèves.</p>
 Corrigé	<p>Cette fenêtre donne la ou les réponses que le professeur accepte comme correctes</p>
 Comportement des élèves	<p>Dans cette fenêtre, un texte présente quelques comportements typiques d'élèves. Dans certains cas, elle comporte un bouton de lien vers une vidéo d'élèves en train de réaliser l'activité et de manifester un de ces comportements</p>

Tableau 15-1. Descriptions des différents boutons de lien.

Les boutons « But », « Préparation » et « Savoir » sont parfois présents dans la page de thème et associés à une partie. Il ouvre alors des fenêtres donnant les informations décrites dans le Tableau 15-1 pour l'ensemble de la partie.

Pour les activités, comme nous l'avons indiqué dans le Tableau 15-1, la fenêtre « Comportement des élèves » peut comporter un lien vidéo qui permet d'avoir accès à un extrait de vidéo d'élèves illustrant un comportement notable. La Figure 5 présente la structure des pages vidéo.

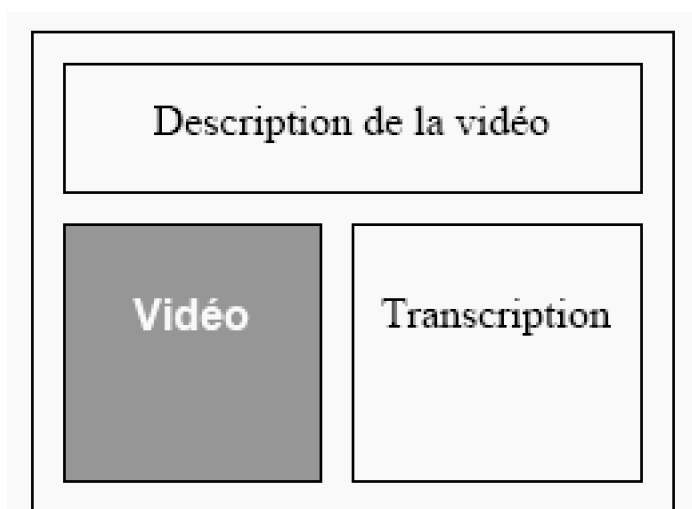


Figure 5. Structure d'une page vidéo (sont présentes une zone de vidéo – en bas à gauche- et deux zones de texte)

La description de la vidéo permet à l'utilisateur de comprendre le contexte de la situation. Elle permet aussi d'attirer son attention sur les éléments clés de la vidéo. La transcription de la vidéo permet à l'utilisateur de mieux comprendre ce qui est dit par les interlocuteurs. Elle lui permet de revenir sur certains passages sans avoir besoin de visionner l'extrait. Il s'agit en général d'extraits courts (environ une minute), ce qui nécessite un travail de sélection et éventuellement de montage.

Nous utilisons l'ensemble des fonctionnalités de cette application Web pour diffuser nos outils. Nous devons respecter la structure générale de celle-ci puisque notre développement s'inscrit dans la continuité de l'application existante. L'application Web comporte deux interfaces, utilisateur et administrateur/concepteur, ce qui permet d'envisager aisément le développement en ligne. Le développement des activités d'évaluation pour le thème « L'Univers en mouvement et le temps » est présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 16 : Développement de PEGASE : un exemple

Nous présentons ici un exemple de diffusion de nos outils par le site Internet PEGASE afin d'illustrer et de commenter le travail que nous avons effectué. Nous tenons à signaler que ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide technique apportée par Sophie Bazin, administratrice du site Internet.

Du point de vue de la structure hiérarchique, nos exercices se trouvent dans le thème « L'Univers en mouvement et le temps ». Ils se situent au même niveau hiérarchique que les « activités ». Ces exercices viennent compléter ceux développés pour l'ensemble de la séquence dans le cadre du projet SESAMES (en cours de diffusion). Toujours au

même niveau hiérarchique, nous proposons pour les différentes parties les tests, c'est-à-dire l'ensemble des exercices composant le devoir surveillé. Ceux-ci sont consultables sous le nom DS n°1, DS n°2, DS n°3 et DS n°4.

Nous avons alimenté les trois premières parties :

- Partie n°1 : Décrire un mouvement avec un modèle ;
- Partie n°2 : Interaction et force ;
- Partie n°3 : Principe d'inertie et autres lois de la mécanique.

Pour la Partie n°1, nous avons ajouté les trois exercices du test 1 (qui apparaissent sur le site comme les exercices 10 à 12) ainsi que le DS n°1. Pour la Partie n°2, nous avons ajouté les cinq exercices du test 2 (exercices 5 à 9) ainsi que le DS n°2. Pour la Partie n°3, nous avons ajouté les deux exercices du test 3, les six exercices du test 4 (exercices 14 à 21) ainsi que les DS n°3 et DS n°4.

De plus, nous avons rajouté pour chaque partie, dans la page de thème, des liens qui permettent de télécharger deux fichiers Word :

- *Fichier exercices élève* présentant l'ensemble des énoncés des exercices (tels qu'ils peuvent être distribués aux élèves) ;
- *Fichier exercices professeur* présentant toute une série de commentaires (détaillés dans la suite) en plus des énoncés.

Nous avons choisi de présenter les différents commentaires associés aux exercices en les illustrant dans le cas d'un exercice. Il s'agit de l'exercice 5 du test 4, consultable sur le site Internet PEGASE sous le nom Exercice n°20 dans la Partie n°3.

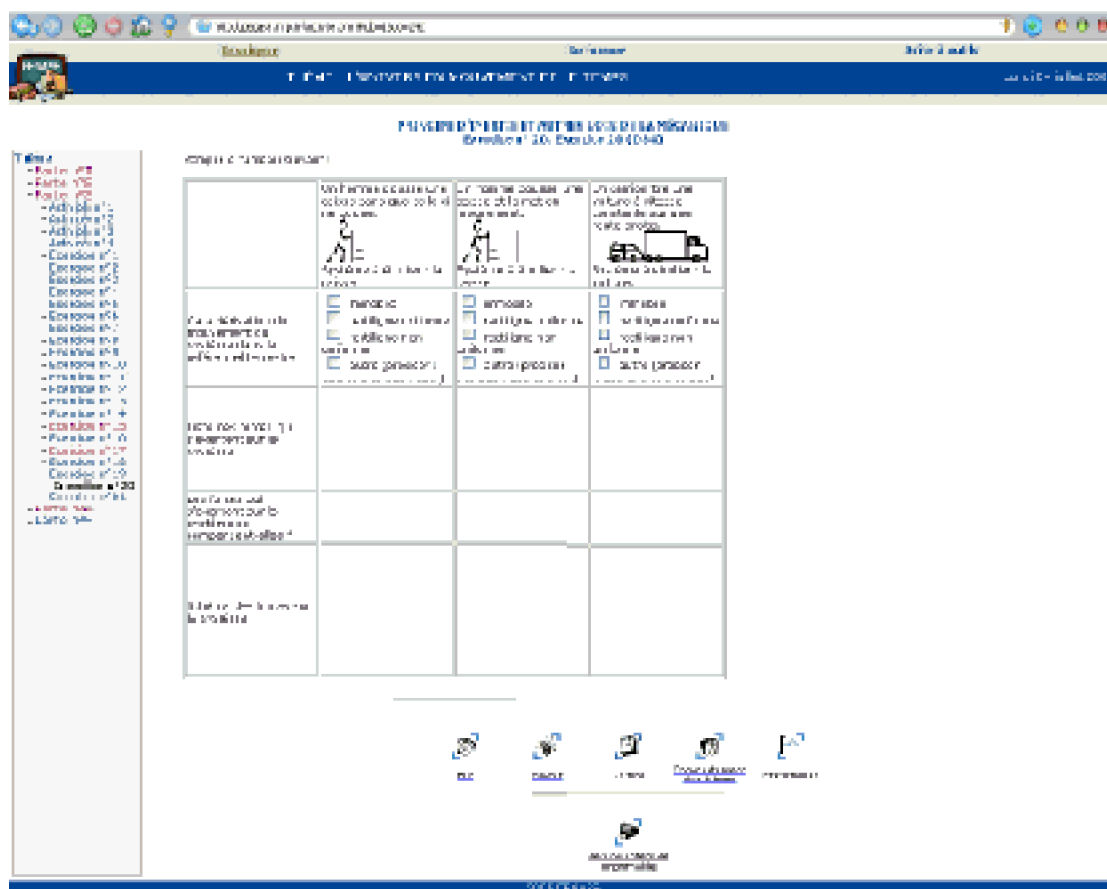


Figure 6. Page de « description » (énoncé) de l'exercice 5 du test 4 (Exercice °20).

Comme dans toutes les pages d'activité du site, un bandeau supérieur permet à la fois de retourner éventuellement au niveau supérieur (page d'accueil de PEGASE, rubrique « Enseigner », rubrique « Se former », rubrique « Boîte à outils ») et de se situer dans la structure (nous sommes ici dans la rubrique « enseigner » et dans le thème « L'univers en mouvement et le temps »). Le bandeau gauche permet de se repérer et de se déplacer dans le thème. Il présente les 5 parties et permet d'avoir accès aux différentes activités pour la partie dans laquelle on se trouve. En violet figurent les parties et activités pour lesquelles les liens ont déjà été activés. En noir figure l'activité dans laquelle on se trouve : ici l'exercice n°20 de la Partie 3.

La page de « description » (énoncé) rappelle le titre de la partie (ici « Principe d'inertie et autres lois de la mécanique »), le numéro et le titre de l'exercice (ici « Exercice 20 (DS4) »). Nous avons choisi d'indiquer le DS dans lequel l'exercice peut se retrouver afin de différencier cet exercice des autres. Cela permet d'éviter que l'enseignant ne le choisisse pour le donner à ses élèves en classe alors qu'il voulait utiliser le devoir

surveillé proposé.

En bas de l'énoncé, dans la page de description, apparaissent les différents boutons de lien. Voici les boutons associés à cet exercice :

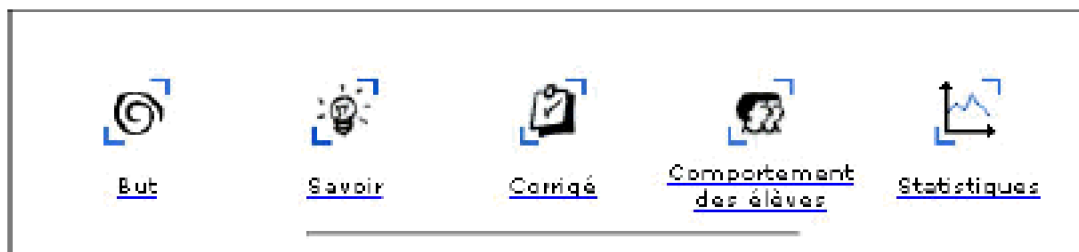
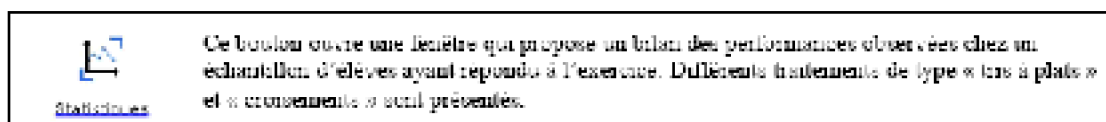


Figure 7. Différents boutons de lien présents dans la page de description de l'exercice 20 de la Partie n°3.

Le bouton préparation n'apparaît plus dans les exercices mais peut apparaître pour les activités de type « Devoir Surveillé ». Il donne alors des informations sur le programme de révision et la durée nécessaire pour répondre à l'ensemble du devoir.

Un sixième type de bouton de lien a été rajouté : le bouton « Statistiques ».



Pour chaque « activité », une version intégrale du texte de l'exercice et de l'ensemble des informations associées peut être obtenue au moyen du bouton « Version intégrale imprimable ».

Pour cet exercice, voici ce que nous avons inscrit dans la fenêtre « But » :

Compétences testées dans les différentes lignes du tableau (cf. énoncé) :

Ligne 1 : Caractérisation du mouvement du système dans le référentiel terrestre

Compétence : Être capable de décrire le mouvement d'un point dans un référentiel donné en termes de direction, sens et vitesse. Cas particulier des mouvements rectiligne, circulaire et uniforme.

Il s'agit ici de passer de la description d'une situation en langue naturelle (présentée dans l'énoncé) à la description du mouvement du système étudié avec les termes du modèle.

Ligne 2 : Liste des forces qui s'exercent sur le système

Compétence : Faire un inventaire des forces exercées sur un système.

Il s'agit ici de passer de la description d'une situation en langue naturelle (présentée dans l'énoncé) à la liste des forces qui s'exercent sur le système étudié.

Ligne 3 : Les forces qui s'exercent sur le système se compensent-elles ?

Compétence : Connaître et savoir utiliser les quatre énoncés communément admis comme étant le principe d'inertie :

- - Si un système est immobile ou s'il est en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse et sa direction ne varient pas), alors les forces qui s'exercent sur le système se compensent.
- - Si un système n'est ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire si sa vitesse et/ou sa direction varient), alors les forces qui s'exercent sur le système ne se compensent pas.

Il s'agit ici de passer de la description du mouvement (réponse à la ligne 1) à la compensation / non-compensation des forces sur le système étudié en utilisant les lois de la mécanique.

Ligne 4 : Schéma des forces sur le système

Compétence : Savoir représenter les forces exercées sur un système (Cette connaissance inclut la capacité à tracer les vecteurs correctement lorsqu'on sait que les forces se compensent (ou à l'inverse ne se compensent pas)).

Il s'agit ici de faire le schéma des forces qui s'exercent sur le système étudié en tenant compte des caractéristiques de chaque force et de la compensation / non-compensation des forces.

Le bouton « But » permet ainsi d'avoir accès aux différentes compétences testées dans l'exercice. Ces compétences sont exprimées avec les formulations proposées par le groupe SESAMES. Elles sont ensuite légèrement reformulées pour définir plus précisément ce qui est demandé dans la question.

Voici ce que nous avons inscrit dans la fenêtre « Savoir » :

Cet exercice met en jeu un problème assez classique : à partir d'une situation du champ expérimental, on demande aux élèves de mettre en application les modèles des parties 1, 2 et 3 :

- - décrire le mouvement avec les termes du modèle ;
- - faire la liste des forces qui s'exercent sur un système donné ;
- - utiliser les lois de la mécanique pour dire si les forces qui s'exercent sur le système se compensent.

L'intérêt de l'exercice est de proposer trois situations afin d'observer l'influence de la situation sur les réponses de l'élève.

La première situation est une situation d'immobilité. La principale difficulté est alors de dire que l'homme exerce une force sur la caisse (puisque celle-ci ne bouge pas).

Dans la deuxième situation, la difficulté réside plutôt dans la caractérisation du mouvement. L'élément important de l'énoncé est "se met en mouvement". Cet élément indique que le mouvement est "non uniforme" puisque la caisse passe d'une vitesse nulle à une vitesse non nulle.

La troisième situation permet surtout de vérifier que l'élève sait que les forces se compensent dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme.

Les erreurs peuvent avoir plusieurs sources.

Pour la description du mouvement :

- - mauvaise visualisation de la situation ;
- - non-connaissance des termes du modèle pour décrire un mouvement.

Pour la liste des forces :

- - non-connaissance du modèle des interactions ;
- - confusion Terre et sol ;
- - utilisation du raisonnement "force implique mouvement donc pas de force exercée par l'homme pour la colonne 1" et éventuellement oubli du sol.

Pour la compensation des forces :

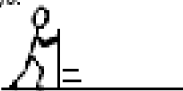
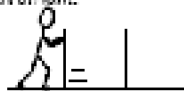

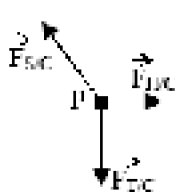
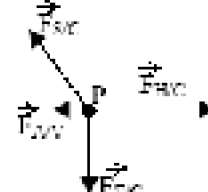
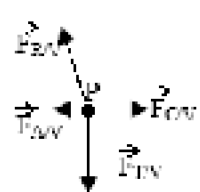
- - erreur dans la réponse sur le mouvement ;
- - non connaissance des lois de la mécanique ;
- - raisonnement de type "nombre de forces impair implique les forces ne peuvent pas se compenser" ;
- - raisonnement du type "mouvement donc les forces ne se compensent pas".

Pour le schéma des forces :

- - erreur dans la réponse sur la liste des forces ou sur la compensation ;
- - non-prise en compte de la compensation ;
- - non-prise en compte d'une ou plusieurs forces ;
- - non-connaissance des caractéristiques d'une ou plusieurs forces ;
- - raisonnement du type "mouvement donc résultante dans le sens du mouvement".

Le bouton « Savoir » permet ainsi d'avoir accès à l'analyse a priori de l'exercice, de repérer les difficultés des élèves et de donner quelques exemples d'erreurs « attendues » des élèves.

Voici ce que nous avons inscrit dans la fenêtre « Corrigé » :

	<p>Un homme pousse une caisse sans que celle-ci ne bouge.</p>  <p>Système à étudier : la caisse</p>	<p>Un homme pousse une caisse et la met en mouvement.</p>  <p>Système à étudier : la caisse</p>	<p>Un camion tire une voiture à vitesse constante sur une route droite.</p>  <p>Système à étudier : la voiture.</p>
Caractérisation du mouvement du système dans le référentiel terrestre	immobile	rectiligne non uniforme (autre : non uniforme)	rectiligne uniforme
Il y a des forces qui s'exercent sur le système	forces exercées par : - la Terre sur la caisse - le sol sur la caisse - l'homme sur la caisse	forces exercées par : - la Terre sur la caisse - le sol sur la caisse - l'homme sur la caisse - l'air sur la caisse	forces exercées par : - la Terre sur la voiture - la route sur la voiture - le camion sur la voiture - l'air sur la caisse
Les forces qui s'exercent sur le système se compensent-elles ?	oui (car la caisse est immobile)	non (car la caisse a un mouvement non uniforme)	oui (car la caisse a un mouvement rectiligne et uniforme)
Schéma des forces sur le système			

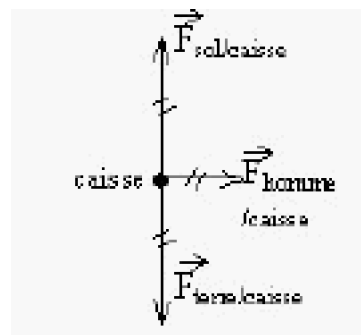
Sont indiquées entre parenthèses les réponses qui sont correctes et qui seront superflues ou nécessaires selon l'exigence de l'enseignant. Nous avons choisi de représenter dans le schéma des forces la force exercée par l'air pour les systèmes en mouvement.

Voici ce que nous avons inscrit dans la fenêtre « Comportement des élèves » :

De nombreux élèves n'ont pas su réaliser le schéma des forces correctement (cf. "statistiques"). Nous avons notamment observé que la plupart des élèves ne savait pas représenter la compensation des forces dans le schéma.

Nous prenons ici l'exemple d'une élève qui a répondu dans la ligne 3 que les forces se compensaient. Elle avait donné comme liste des forces : force exercée par la Terre, force exercée par le sol et force exercée par l'homme.

Voici le schéma que cette élève a représenté dans la ligne 4 :



Nous voyons donc qu'elle a représenté toutes les forces qu'elle avait listées, qu'elle leur a donné des caractéristiques convenables mais que la somme vectorielle n'est pas nulle.

Nous proposons un extrait vidéo qui permet de mieux comprendre la difficulté de l'élève

Vidéo



La fenêtre « Comportement des élèves » permet donc de mettre en avant une difficulté constatée d'élèves et de l'illustrer par un exemple concret. La vidéo propose un extrait d'entretien qui permet de mieux comprendre la réponse écrite (voir Figure).

[illegible]




Figure 8. Fenêtre vidéo pour l'exercice 20 de la Partie n°3.

Cette vidéo permet d'illustrer une difficulté d'élève rencontrée à plusieurs reprises

dans les réponses écrites des élèves et dans les entretiens : la représentation d'un schéma des forces comprenant trois forces pour une situation où les forces se compensent. Une phrase du cours de l'élève interviewée indique que si deux forces ont même direction, même intensité et des sens opposés alors elles se compensent. L'élève a ici besoin d'une réciproque du type « si les forces se compensent alors... ». Elle commence avec le critère « si les forces se compensent alors elles ont même longueur ». Elle revient ensuite à la phrase du cours et en déduit que les forces doivent se compenser deux par deux puisqu'une force va se compenser avec une autre force « de sens opposé ». L'élève en conclut donc qu'il faut nécessairement un nombre pair de forces pour qu'elles puissent se compenser. Sa réponse n'est alors plus compatible avec la réponse de la ligne 3 (« les forces se compensent »).

Voici ce que nous avons inscrit dans la fenêtre « Statistiques ». Les réponses correctes sont indiquées en rouge sur l'écran (nous les avons indiquées en gras ici).

Voici les performances observées sur un échantillon de 394 élèves :

	<p>Un homme pousse une caisse sans que celle-ci ne boude.</p>  <p>Système à étudier : la caisse</p>	<p>Un homme pousse une caisse et la met en mouvement.</p>  <p>Système à étudier : la caisse</p>	<p>Un camion tire une voiture à vitesse constante sur une route droite.</p>  <p>Système à étudier : la voiture</p>
Caractérisation du mouvement du système dans le référentiel terrestre	<p>0,8% pas de réponse 97,0% immobile 0,5% rectiligne uniforme 1,8% rectiligne uniforme et immobile 0% rectiligne non uniforme 0% autre</p>	<p>2,3% pas de réponse 0% immobile 10,9% rectiligne uniforme 81,5% rectiligne non uniforme 3% autre 2,3% on ne peut pas savoir</p>	<p>1% pas de réponse 0,5% immobile 96,4% rectiligne uniforme 1,3% rectiligne non uniforme 0,3% autre 0,5% on ne peut pas savoir</p>
Liste des forces qui s'exercent sur le système	<p>Force exercée par : la Terre 97,2% le sol 07,8% l'homme 03,0% l'air 4,3% frottements 5,3%</p>	<p>Force exercée par : la Terre 95,0% le sol 07,3% l'homme 57,0% l'air 25,8% frottements 7,4%</p>	<p>Force exercée par : la Terre 65,4% la route 67,8% le camion 95,4% l'air 30,7% frottements 5,1%</p>
Toutes les forces qui s'exercent sur le système se compensent-elles ?	<p>1,0% pas de réponse 88,3% oui 10,2% non</p>	<p>3,0% pas de réponse 0,3% on ne peut pas savoir 11,7% oui 84,8% non</p>	<p>2,0% pas de réponse 79,4% oui 18,0% non</p>
Schéma des forces sur le système	<p>61 (sur 380 soit 16,1%) élèves ont répondu correctement sur le schéma les forces se compensent : 170</p>	<p>61 (sur 369 soit 16,5%) élèves ont répondu correctement sur le schéma les forces ne se compensent pas : 334</p>	<p>61 (sur 367 soit 16,6%) élèves ont répondu correctement sur le schéma les forces se compensent : 119</p>

Pour la liste des forces, nous avons aussi regardé le fait qu'elle soit ou non complète. Nous avons considéré que la liste était incomplète s'il manquait au moins la force exercée par la Terre, la force exercée par le sol ou la route ou la force exercée par l'homme ou le camion. Nous avons considéré qu'elle était complète si ces 3 forces étaient mentionnées et si aucune autre force "incorrecte" (par exemple force de la masse ou force exercée par la caisse) n'était mentionnée.

liste des forces colonne 1	liste des forces colonne 2	liste des forces colonne 3	
		complète	incomplète
complète	complète	199 (50,5%)	9 (2,3%)
	incomplète	4 (1,0%)	4 (1,0%)
incomplète	complète	43 (10,9%)	6 (1,5%)
	incomplète	14 (3,5%)	115 (29,2%)

En tenant compte de la nature des forces, de leurs caractéristiques et de la compensation des forces, nous avons aussi regardé la performance des élèves sur les schémas de forces (352 élèves ont représenté les trois schémas des forces).

schéma des forces colonne 1	schéma des forces colonne 2	schéma des forces colonne 3	
		correct	incorrect
correct	correct	27 (7,7%)	18 (5,1%)
	incorrect	11 (3,1%)	12 (3,4%)
incorrect	correct	7 (2,0%)	7 (2,0%)
	incorrect	13 (3,6%)	257 (73,0%)

Nous avons enfin comparé les lignes 1 et 3 du tableau pour voir si les élèves étaient capables de passer du mouvement à l'information sur la compensation ou la non compensation des forces.

Pour la première colonne voici les résultats obtenus :

Mouvement dans la première colonne	Compensation des forces dans la première colonne			total
	les forces se compensent	les forces ne se compensent pas	pas de réponse	
immobile	338 (57,9%)	40 (10,2%)	4 (1,0%)	382
immobile et rectiligne uniforme	7 (2,0%)	0	0	7
rectiligne uniforme	1 (0,3%)	0	1 (0,3%)	2
pas de réponse	2 (0,5%)	0	1 (0,3%)	3
total	346	40	5	394

Pour la deuxième colonne voici les résultats obtenus :

**Evaluer la compréhension des concepts de mécanique chez des élèves de seconde :
Développement d'outils pour les enseignants**

Mouvement dans la deuxième colonne	Compensation des forces dans la deuxième colonne					total
	les forces ne se compensent pas	les forces se compensent	on ne peut pas savoir	autre	pas de réponse	
<i>rectiligne non uniforme</i>	291 (73,9%)	21 (5,3%)	0	0	0 (2,3%)	321
<i>rectiligne uniforme</i>	19 (4,8%)	23 (5,8%)	0	0	1 (0,3%)	43
<i>autre</i>	12 (3,0%)	0	0	0	0	12
<i>on ne peut pas savoir</i>	6 (1,5%)	1 (0,3%)	1 (0,3%)	1 (0,3%)	0	9
<i>pas de réponse</i>	6 (1,5%)	1 (0,3%)	0	0	2 (0,6%)	9
total	331	46	1	1	12	391

Pour la troisième colonne voici les résultats obtenus :

Mouvement dans la troisième colonne	Compensation des forces dans la troisième colonne			Total
	les forces se compensent	les forces ne se compensent pas	pas de réponse	
<i>rectiligne uniforme</i>	307 (77,9%)	55 (16,5%)	8 (2,0%)	380
<i>rectiligne non uniforme</i>	2 (0,3%)	3	0	5
<i>immobile</i>	2 (0,6%)	0	0	2
<i>autre</i>	0	1 (0,3%)	0	1
<i>on ne peut pas savoir</i>	1 (0,3%)	1 (0,3%)	0	2
<i>pas de réponse</i>	1 (0,3%)	1 (0,3%)	2 (0,6%)	4
total	313	71	10	394

La fenêtre « Statistiques » permet donc de présenter les performances des élèves pour chaque question. On peut aussi présenter quelques croisements afin de montrer d'une part le lien entre les questions (description du mouvement et compensation des forces par exemple) ou l'intérêt de poser plusieurs fois la même question dans différentes situations (liste des forces et schéma des forces).

Nous avons donc illustré ici au moyen d'un exercice la façon dont nous avons alimenté l'application Web PEGASE existante. Il a été nécessaire d'ajouter d'un bouton « Statistiques » mais avons pour le reste conservé la structure existante. Nous avons ainsi proposé pour les trois premières parties 16 exercices et 4 tests, accompagnés de nos résultats.

Conclusion

Ce travail avait un double objectif. Il s'agissait dans un premier temps de produire et de valider des outils d'évaluation pour les enseignants. Cette production nous a conduit à nous poser différentes questions et à mener une réflexion plus générale sur l'évaluation des concepts enseignés en mécanique.

Cette réflexion, associée à la production de ces outils, nous a permis d'obtenir divers résultats de recherche, de nature très différentes :

- d'un point de vue méthodologique, nous avons vu comment nous pouvions utiliser des résultats de la recherche, aussi bien sur l'évaluation comme objet de recherche que sur l'apprentissage des concepts en didactique de la physique, pour construire des outils d'évaluation. Nous avons aussi vu comment valider un outil d'évaluation, en confrontant d'une part les réponses écrites entre elles (analyse des cohérences) et d'autre part les réponses écrites à une autre source d'information (réalisation d'entretiens). Cette méthodologie est perfectible mais pose un premier pas dans l'ingénierie didactique d'outils d'évaluation pour l'enseignant de physique-chimie ;
- du point de vue de la validation de la séquence d'enseignement, nos résultats permettent d'évaluer les acquis et les difficultés des élèves après enseignement ;
- d'un point de vue plus général sur les situations d'évaluation scolaire, notre travail permet de mieux comprendre le fonctionnement des élèves en situation de devoir surveillé.

Nous essayons ici de présenter un bilan de notre travail en mettant en avant les réponses que nous avons apportées aux questions de recherches. Nous présentons ensuite l'intérêt de notre travail et les perspectives qu'il présente.

1.Retour sur les questions de recherche

1.1. Production d'outils

Une analyse détaillée des savoirs en jeu dans l'enseignement nous a permis de repérer les différentes composantes de concept enseignées et d'identifier celles qui nous semblaient importantes à évaluer.

Une réflexion était ensuite nécessaire sur la formulation des questions afin de s'assurer que chaque question permettait de bien évaluer la composante souhaitée. Pour cela, nous avons utilisé à la fois :

- des travaux ayant servi au développement de la séquence (utilisation d'hypothèses d'apprentissage telles que la modélisation, les registres sémiotiques ou la nécessité de mettre en jeu les concepts dans plusieurs situations matérielles) ;
- des travaux sur les tests d'évaluation des acquis des élèves utilisés en recherche (utilisation des conceptions, évaluation de la cohérence des réponses des élèves).

Des différents tests utilisés en recherche, nous avons plus particulièrement repris les travaux de Millar et Hames (2001a, 2001b, à paraître) dont l'objectif était très proche du nôtre : produire pour les enseignants des tests d'évaluation ciblés sur la compréhension des élèves en utilisant les résultats de la recherche.

L'évaluation de la cohérence des réponses écrites des élèves est au centre de la production de nos tests puisque nous considérons qu'il est nécessaire d'évaluer plusieurs fois la même composante, dans des situations variées, pour pouvoir avoir des informations sur le niveau de compréhension des composantes évaluées.

Afin de produire des tests fonctionnels et utilisables par l'enseignant, nous avons observé les pratiques d'évaluation de quelques enseignants et nous avons utilisé les travaux de recherche sur ces pratiques.

Un test de fin de partie a été développé pour chaque partie de la séquence afin de faire le point au fur et à mesure de l'apprentissage et de pouvoir ainsi observer l'évolution des performances des élèves au cours de l'enseignement.

De la méthodologie de développement de la séquence, nous avons repris :

- l'hypothèse de modélisation : en partant du principe que la construction du sens en physique nécessite des liens entre ce qui relève d'une part du monde des objets et des événements et ce qui relève d'autre part du monde de la théorie et du modèle,

nous avons choisi d'évaluer la compréhension par les élèves des concepts enseignés en leur demandant d'effectuer de tels liens ;

- l'hypothèse des registres sémiotiques : en admettant que la compréhension d'un concept nécessite la capacité de passer d'une représentation à l'autre de ce concept, nous avons demandé aux élèves de manipuler différents registres.

Un tableau à double entrée « Registre sémiotique » / « Modélisation » nous permet de repérer les passages demandés aux élèves pour chaque question et de les faire varier sur l'ensemble des questions du test.

Nous avons vu qu'il était nécessaire de respecter certaines contraintes pour que nos tests soient utilisables par les enseignants. Il faut entre autres :

- qu'ils correspondent au contenu du programme et de l'enseignement fait en classe ;
- qu'ils puissent donner lieu à un corrigé et une note ;
- qu'ils soient réalisables par la quasi-totalité des élèves pendant le temps imparti ;
- qu'ils ne soient pas trop éloignés de la pratique habituelle d'évaluation.

1.2. Utilisation et validation des outils

Les outils que nous avons développés ont été utilisés par différents enseignants. Ceux-là n'ont pas jugé nécessaire de prévenir leurs élèves de la différence de ces tests. Ils s'inscrivaient donc dans le contrat classique.

Chaque enseignant ayant utilisé nos tests a pu définir un barème et donner une note à l'ensemble de ces élèves. La moyenne des notes sur ces tests était un peu élevée mais restait « acceptable ». Les enseignants qui ont utilisé nos quatre tests n'ont pas donné d'évaluation supplémentaire sur l'enseignement de mécanique. Cependant, nous pensons que nos tests ne sont probablement pas suffisants pour les enseignants et qu'ils devraient être donnés en plus de problèmes d'évaluation qui évaluent plusieurs compétences en même temps et qui préparent à l'épreuve du baccalauréat.

Du point de vue des élèves, nous avons vu que nos tests ont été bien acceptés. Il n'y a pas eu de problème majeur de compréhension de l'énoncé. Les élèves interviewés n'ont pas semblé déstabilisés par la forme des tests.

Deux remarques sont apparues :

la nécessité de réfléchir pour répondre aux questions du test et de ne pas simplement « appliquer le cours » ;

l'avantage d'avoir des choix de réponses (permettant pour certains élèves de proposer des alternatives auxquelles ils n'auraient pas pensé, pour d'autres au contraire de faire le tri parmi les différentes réponses qui pouvaient leur venir à l'esprit).

L'analyse des réponses écrites des élèves nous a permis d'établir la maîtrise des différentes composantes de concepts enseignés pour les élèves en regardant le nombre de bonnes réponses données aux différentes questions mettant en jeu cette composante

(cf. Conclusion de la Partie « Analyse des test », pp.270 et suivantes).

Il était bien sûr nécessaire de valider ces résultats. Nous avons choisi d'utiliser la cohérence interne des réponses des élèves afin d'améliorer les indicateurs de la compréhension. Nous avons aussi mis en place une validation externe au test en menant des entretiens individuels auprès d'élèves ayant répondu aux questions par écrit. Sur les 12 élèves pour lesquels nous avons analysé l'entretien, aucun n'a donné des réponses en total désaccord avec ses réponses écrites. Dans l'ensemble, l'analyse des entretiens a confirmé les conclusions obtenues à partir des réponses écrites.

Cependant, nous avons noté des hésitations chez de nombreux élèves, voire des instabilités dans le temps. Les élèves semblent avoir écrit ce qui leur paraissait correct au moment du devoir surveillé mais pensent parfois qu'une autre réponse serait plus appropriée le jour de l'entretien. Ce changement peut être dû aux conditions de passation mais aussi à l'instabilité dans le temps des connaissances des élèves. On aurait pu avoir plus d'informations en effectuant un deuxième entretien ultérieur pour voir si la réponse donnée lors du premier entretien était stable dans le temps.

1.3. Observations des élèves en situation de devoir surveillé

Nous avons vu que toute une série d'éléments avaient une influence sur la façon dont l'élève répondait aux questions en situation de devoir surveillé. Ces différents éléments peuvent modifier ce qui est donné à voir à l'enseignant et qui sera utilisé comme un indicateur de compréhension. On peut distinguer deux grands types d'éléments qui vont « interférer » avec la compréhension : certains sont directement liés à la compréhension (représentation du problème, certitude face à la réponse) alors que d'autres sont plus indépendants (contrainte de temps, « forme du jour », mauvaise lecture de l'énoncé...). Il nous semble qu'il s'agit d'un continuum dans lequel la compréhension va prendre plus ou moins d'importance. Il est par exemple évident que la compréhension des concepts en jeu dans l'énoncé, ainsi que celle des « structures profondes » du savoir en jeu, va jouer un rôle déterminant dans la représentation du problème. On pourrait penser qu'au contraire la compréhension n'est pas liée à la contrainte de temps. Cependant, les tests sont faits pour qu'un élève ayant plutôt bien compris l'ensemble des concepts mis en jeu ait le temps de répondre à toutes les questions. La durée devient alors une véritable contrainte pour des élèves ayant des difficultés de compréhension ou une compréhension partielle. Nous pensons qu'aucune évaluation ne peut éviter ces interférences, quelle que soit la modalité (évaluation écrite, orale ou expérimentale), mais qu'il est important d'être conscient des limites de l'évaluation pour ne pas sur-interpréter les indicateurs.

Nous avons distingué différentes influences mais notre analyse a montré qu'il était difficile de les identifier indépendamment les unes des autres. Elles semblent participer de façon non négligeable à la réussite ou à l'échec de l'élève. Nous avons notamment observé chez deux élèves (deux filles qu'on pourrait qualifier de « bonnes élèves scolaires ») la maîtrise des règles de fonctionnement de ce genre de situation. Ceci semble représenter un véritable avantage pour rendre publique leur compréhension. Au contraire, certains élèves en difficulté, qui ne semblent pas maîtriser ces règles, perdent beaucoup d'énergie à « redécouvrir » voire à « reconstruire » le savoir ou les stratégies.

2. Intérêt du travail

Nous avons produit des outils d'évaluation pour l'enseignant qui peuvent être utilisés en complément d'une séquence issue de la recherche. Comme nous l'avons indiqué dans la partie théorique (chapitre 3), la plupart des ingénieries didactiques proposent aux enseignants des séquences d'enseignement sans prendre en compte l'évaluation. L'enseignant utilisant la séquence doit par conséquent fabriquer lui-même son instrument d'évaluation ou faire appel à des instruments plus « traditionnels » et ainsi risque de pratiquer une évaluation en décalage avec l'enseignement.

Notre travail présente donc l'intérêt de mettre en place une méthodologie de développement d'un tel instrument dans le cadre d'une ingénierie didactique. Nous proposons ainsi différents types d'outils à associer à chaque exercice et test développé :

- analyse des compétences évaluées dans l'exercice (en lien avec le programme) ;
- analyse des savoirs en jeu dans l'exercice et des conceptions pouvant être mises en œuvre par les élèves lors de sa réalisation ;
- corrigé de l'exercice ;
- performances observées chez les élèves (tris à plats et croisements) ;
- comportements « notables » d'élèves illustrés par des réponses écrites analysées par le chercheur.

Cette méthodologie peut être réutilisée pour d'autres ingénieries. Elle est bien évidemment perfectible mais elle présente l'intérêt de soulever des questions et d'y apporter des éléments de réponses dans un champ trop peu exploité.

Ce travail nous a aussi permis d'analyser en partie l'effet de l'enseignement Outils chez les élèves. Nous avons mis en évidence les composantes qui posent encore des difficultés aux élèves après enseignement. Au contraire, certaines composantes semblent maîtrisées par la majorité des élèves. Les résultats que nous avons trouvés sont en adéquation avec les autres recherches sur les difficultés des élèves, en particulier les difficultés sur le principe des actions réciproques (Viennot, 1989). Nous avons ainsi pu apporter quelques modifications au contenu de la séquence sur des points qui nous semblaient manquer. Nous avons mis en Annexes les anciennes versions et les versions actuelles de la séquence afin de permettre au lecteur de voir certains des changements effectués.

3. Perspectives

Ce travail présente de nombreuses perspectives.

Tout d'abord, le grand nombre de données recueillies pourrait être utilisé à différentes fins :

- les données recueillies lors de l'étude préalable peuvent permettre d'analyser le lien entre l'activité de l'élève en classe et son comportement en situation de devoir surveillé (puisque nous avons filmé quatre élèves pendant la totalité de l'enseignement, que nous avons recueilli leurs productions en classe et en devoir surveillé et que nous les avons interviewés après chaque devoir surveillé) ;
- les fichiers SPSS comportant l'ensemble des réponses des élèves aux différents tests peuvent permettre l'analyse statistique de celles-ci afin de voir à quels critères nos tests répondent (discrimination des élèves, tests de généralisabilité, etc.) ;
- les interviews non analysées peuvent permettre de confirmer nos résultats.

De plus, nos résultats indiquent qu'il serait souhaitable d'apporter quelques modifications aux énoncés des tests et il serait alors nécessaire de reprendre la méthodologie d'analyse et de validation pour vérifier que ces changements apportent bien les améliorations souhaitées.

Le site PEGASE pourra aussi faire l'objet d'une étude afin de voir la pertinence des outils développés pour aider les enseignants dans l'évaluation de leurs élèves. Il serait intéressant d'étudier l'usage de nos tests et des différents commentaires associés par un grand nombre d'enseignants. Pour cela, il faudrait mettre en place une observation directe d'enseignants en train d'utiliser le site PEGASE et de faire passer des questionnaires à un échantillon plus large afin de recueillir leurs commentaires sur les tests proposés. Il serait de plus intéressant de voir si nos tests peuvent être utilisés par des enseignants ayant recours à un autre enseignement que la séquence Outils.

Enfin, un travail plus conséquent consisterait à reprendre notre méthodologie afin de développer des outils d'évaluation pour d'autres séquences existantes.

Références bibliographiques

- Allal, L. (1979). Stratégies d'évaluation formative : conceptions psycho-pédagogiques et modalités d'application. In L. Allal, J. Cardinet & P. Perrenoud (Eds.), *L'évaluation formative dans un enseignement différencié* (pp. 130-156).
- Allal, L., Cardinet, J., & Perrenoud, P. (1979). *L'évaluation formative dans un enseignement différencié*. Berne: Peter Lang.
- Barbier, J.-M. (1985). *L'évaluation en formation* (Pédagogie d'aujourd'hui ed.). Paris: Presse Universitaire de France.
- Beaton, A. E. (1998). Comparing cross-national student performance on TIMSS using different test items. *International Journal of Educational Research*, 29, 529-542.
- Belhoste, B. (Ed.). (2002). *L'examen Evaluer, sélectionner, certifier XVIe-XXe siècles*. Paris: INRP, numéro spécial de la revue Histoire de l'Education.
- Black, P. (1998a). Assessment by Teachers and the Improvement of Students' Learning. In B. J. Fraser & K.G. Tobin (Ed.), *International Handbook of Science Education* (Vol. Part two, pp. 811-822). Dordrecht: Kluwer.
- Black, P. (1998b). Evaluation and Assessment. In A. Tiberghien, L. Jossem & J. Barojas (Eds.), *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education: ICPE*. <disponible en ligne à <http://www.physics.ohio-state.edu/~jossem/ICPE/BOOKS.html>>
- Black, P., & William, D. (1998). *Inside the Black Box: raising Standards Through*

- Classroom Assessment*. <disponible en ligne
<http://www.pdkintl.org/kappan/kbla9810.htm> >
- Bloom, B., Hastings, J. T., & Madaus, G. F. (1971). *Handbook of formative and Summative evaluation of Student Learning*. New York: McGraw-Hill.
- Bodin, A. (1997). L'évaluation du savoir mathématique Questions et méthodes. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 17(1), 49-96.
- Bonnet, G. (1996). Effects of Evaluation Procedures on Educational Policy Decisions in France. *International Journal of Educational Research*, 25(3), 249-256.
- Brousseau, G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 7(2).
- Buty, C., & Cornuéjols, A. (2002). Evolution des connaissances chez l'apprenant. In A. Tiberghien, C. Buty, F. Cordier, M. Coquidé, A. Cornuéjols & C. Laborde (Eds.), *Des connaissances naïves au savoir scientifique*. Paris: Programme Ecole et Sciences cognitives.
- Buty, C., Tiberghien, A., & Le Maréchal, J.-F. (2004). Learning hypotheses and associated tools to design and to analyse teaching-learning sequences. *International Journal of Science Education*, 26(5), 579-604.
- Cardinet, J. (1986). *Pour apprécier le travail des élèves*. Bruxelles: De Boeck.
- Cardinet, J. (1988). Réflexions d'enseignants sur l'évaluation des élèves. In *Evaluation scolaire et pratique*. Bruxelles: De Boeck.
- Cardinet, J., Mokonsi, G. B., Bain, D., Johnson, S., & Bertrand, R. (2003). Numéro thématique : Que valent nos mesures ? *Mesure et évaluation en éducation*, 26(1-2).
- Chastrette, M. (1989). *Démarches et outils de l'évaluation*. Lyon: LIRDIS.
- Chevallard, Y. (1985). *La transposition didactique*. Grenoble: La pensée sauvage.
- Chevallard, Y. (1986). Vers une analyse didactique des faits d'évaluation. In J.-M. De Ketele (Ed.), *L'évaluation : approche descriptive ou prescriptive ?* (pp. 31-59). Bruxelles: De Boeck.
- Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique : perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 12(1), 73-111.
- Chi, M., Feltovitch, P., & Glaser, R. (1981). Categorisation and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- Chomat, A., Larcher, C., & Méheut, M. (1988). Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième. *ASTER*, 7, 143- 184.
- Chomat, A., Larcher, C., & Méheut, M. (1992). Modèle particulière et démarches de modélisation. In *Enseignement et apprentissage de la modélisation* (pp. 119-169). Paris: INRP.
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50(1), 66-71.
- Closset, J.-L. (1983). D'où proviennent certaines "erreurs" rencontrées chez les élèves et les étudiants en électrocinétique ? Peut-on y remédier ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 657, 81-102.

-
- Closset, J.-L. (1989). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 931-949.
- Closset, J.-L. (1992). Raisonnements en électricité et en hydrodynamique. *ASTER*, 14, 143-155.
- Coppé, S. (1993). *Processus de vérification en mathématiques chez les élèves de première scientifique e situation de devoir surveillé*. Université Claude Bernard - Lyon I, Lyon.
- Coppé, S. (1998). Composantes privées et publiques du travail de l'élève en situation de devoir surveillé de mathématiques. *Educational Studies in Mathematics*, 35, 129-151.
- Coulaud, M. (2002). *Etude du rôle de l'articulation oral / écrit dans un TP de mécanique en seconde : une étude de cas*. Université Lyon 2: Mémoire de DEA.
- Crépault, J. (1989). *Temps et raisonnement. développement cognitif de l'enfant à l'adulte*. Lille: Presses Universitaires de Lille.
- Cronbach, L. J., Gleser, G. C., Nanda, H., & Rajaratnam, N. (1972). *The dependability of behavioural measurements: Theory of generalisability for scores and profiles*. New York: John Wiley.
- De Ketele, J.-M. (1989). L'évaluation de la productivité des institutions d'éducation. *Cahiers de la Fondation Universitaire : Université et société, le rendement de l'enseignement universitaire*.
- cité dans De Ketele et al. (1997) et dans Roegiers (2004)
- De Ketele, J.-M. (1993). L'évaluation conjuguée en paradigmes. *Revue Française de Pédagogie*(103), 59-80.
- De Ketele, J.-M., & Gerard, F.-M. (à paraître). La validation des épreuves d'évaluation selon l'approche des compétences. *Mesure et Evaluation en Education* <disponible en ligne à <http://www.bief.be/enseignement/publication/validcomp.html> >
- De Ketele, J.-M., Gerard, F.-M., & Roegiers, X. (1997). L'évaluation et l'observation scolaires : deux démarches complémentaires. *Educations - Revue de diffusion des savoirs en éducation*(12), 33-37 <disponible en ligne à <http://www.bief.be/enseignement/publication/evalobs.html> >
- De Landsheere, G. (1979). *Dictionnaire de l'évaluation et de la recherche en éducation*. Paris: PUF.
- Doml, G., & Wieme, F. (1998). *L'évaluation des élèves en classes : ses effets sur l'enseignement et son utilité pédagogique ; sa contribution à la progression des apprentissages*. Paris: Ministère de l'Education nationale et de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.
- Driver, R. (1989). Students' conceptions and the learning of science. *International Journal of Science Education*, 11(5), 481-490.
- Driver, R., Guesne, E., & Tiberghien, A. (1985). *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press.
- Dumas-Carré, A., & Goffard, M. (1997). *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique*. Paris: Armand Colin.

- Dumas-Carré, A., Goffard, M., & Gil, D. (1992). Les difficultés des élèves liées aux différentes activités cognitives de la Résolution de Problèmes. *ASTER*, 14, 53-75.
- Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, 5, 37-65.
- Duval, R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine*. Bern: Peter Lang.
- Duval, R. (2000). Ecriture, Raisonnement et Découverte de la Démonstration en Mathématiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 20(2), 135-170.
- Duval, R. (2001). Ecriture et compréhension : Pourquoi faire écrire des textes de démonstration par les élèves ? In E. Barlin, R. Duval, I. Giorgiutti, J. Houdeline & C. Laborde (Eds.), *Produire et lire des textes de démonstration* (pp. 183-205). Paris: Ellipses.
- Erickson, G. L. (1980). Children's Viewpoints of Heat : A Second Look. *Science Education*, 64(3), 323-336.
- Feldmann, S., & Chevallard, Y. (1986). *Pour une analyse didactique de l'évaluation*. Marseille: IREM d'Aix-Marseille. cité dans Bodin (1997)
- Félix, M.-C. (2002). *Une analyse comparative des gestes de l'étude personnelle : le cas des mathématiques et de l'histoire*. Université Aix-Marseille 1, Aix-Marseille <disponible en ligne à <http://christine.felix.free.fr/> >
- Finegold, M., & Gorsky, P. (1991). Students' concepts of force as applied to related physical systems: a search for consistency. *International Journal of Science Education*, 13(1), 97-113.
- Fossati, A. (1996). Formation à l'évaluation. *Revue Internationale d'éducation*, 11, 45-51.
- Gaidioz, P., & Tiberghien, A. (2003). Un outil d'enseignement privilégiant la modélisation. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 97.
- Gaidioz, P., Tiberghien, A., Richoux, H., Darley, B., Guillaud, J.-C., Robardet, G., et al. (2003). *Conception et analyses d'activités pour la formation scientifique* (No. 30214): INRP.
- Gerard, F.-M. (2002). L'indispensable subjectivité de l'évaluation. *Antipodes*(156), 26-34 <disponible en ligne à <http://www.bief.be/enseignement/publication/SubjEval.html> >
- Gilbert, J. K., & Boulter, C. J. (1998). Learning Science through Models and Modelling. In B. Frazer, Tobin, K. (Ed.), *The International Handbook of Science Education*. Dordrecht: Kluwer.
- Gilliéron, P. (2003). *Abandon de l'évaluation traditionnelle du travail des élèves dans le canton de Vaud : attentes à l'origine des innovations et point de vue des familles*. Paper presented at the 16ème colloque international de l'Admée-Europe Evaluation entre efficacité et équité, Liège.
- Guillaud, J.-C. (1998). *Enseignement et apprentissage du concept de force en classe de troisième*. Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Hadji, C. (1990). *L'évaluation, règles du jeu*. Paris: ESF.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985a). The initial knowledge state of college physics students. *American Journal of Physics*, 53, 1043-1048 <disponible en ligne à

- <http://modeling.la.asu.edu/R&E/InitialKnowledge.pdf> >
- Halloun, I., & Hestenes, D. (1985b). Common Sense Concepts about Motion. *American Journal of Physics*, 53(11), 1056-1065 <disponible en ligne à http://modeling.la.asu.edu/R&E/Hestenes_CommonSenseConcept.pdf >
- Harlen, W. (2001). The Assessment of Scientific Literacy in the OCDE/PISA Project. In H. Behrendt et al(Eds.), *Research in Science Education - Past, Present and Future* (pp. 49-60). Dordrecht: Kluwer.
- Hestenes, D. (1995). What do graduate oral exams tell us? *American Journal of Physics*, 63(12), 1069 <disponible en ligne à <http://modeling.la.asu.edu/R&E/WhatDoOralExamsTellUs.pdf> >
- Hestenes, D., & Wells, M. (1992). A Mechanics Baseline Test. *The Physics Teacher*, 30, 159-166 <disponible en ligne à <http://modeling.la.asu.edu/R&E/MechBaseline.pdf> >
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 30, 141-158 <disponible en ligne à <http://modeling.la.asu.edu/R&E/FCI.PDF> >
- Hobden, P. (1998). The Role of Routine Problem Tasks in Science Teaching. In B. J. Fraser & K.G. Tobin (Eds.), *International Handbook of Science Education* (Vol. Part One, pp. 219-231). Dordrecht: Kluwer.
- Hulin, N. (1992). Le problème de physique aux XIXe et XXe siècles Forme, rôle et objectifs. *Histoire de l'éducation*, 54, 39-58.
- Jiménez, J. D., & Perales, F. J. (2001). Graphic representation of force in secondary education: analysis and alternative educational proposals. *Physics Education*, 36, 227-235.
- Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1986). L'électrocinétique du Collège à l'Université. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 683(779-799).
- Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris: PUF.
- Johsua, S., & Félix, C. (2002). Le travail des élèves à la maison : une analyse didactique en termes de milieu pour l'étude. *Revue Française de Pédagogie*, 141, 89-97 <disponible en ligne à <http://christine.felix.free.fr/> >
- Julo, J. (1995). *Représentation des problèmes et réussite en mathématiques. Un apport de la psychologie cognitive à l'enseignement*. Rennes: Presses Universitaires de Rennes.
- Kozma, R. (2003). The material features of multiple representations and their cognitive and social affordance for science understanding. *Learning and Instruction*, 13, 205-226.
- Küçüközer, H. A. (2000). *Une compréhension de la notion d'interaction dans le cadre d'un enseignement de mécanique*. Université Lyon 2: Mémoire de DEA.
- Leach, J., & Scott, P. (2002). Designing and evaluating science teaching sequences: an approach drawing upon the concept of learning demand and a social constructivist perspective on learning. *Studies in Science Education*, 38, 115-142.
- Lemeignan, G., & Weil-Barais, A. (1988). Gestions d'activités de modélisation en

- classe. *ASTER*, 7, 121-141.
- Lemeignan, G., & Weil-Barais, A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Paris: Hachette. cité dans Lopes et al. (1999)
- Levasseur, J. (1996). L'évaluation nationale des acquis des élèves : finalités et exploitations. *Revue Internationale d'éducation*, 11, 101-114.
- Licht, P., & Thijs, G. (1990). Method to trace coherence and persistence of preconceptions. *International Journal of Science Education*, 12(4), 403-416.
- Lieury, A., & Fenouillet, F. (1997). *Motivation et réussite scolaire*. Paris: Dunod.
- Lopes, J. B., Costa, N., Weil-Barais, A., & Dumas-Carré, A. (1999). Évaluation de la maîtrise des concepts de la mécanique chez des étudiants et des professeurs. *Didaskalia*, 14, 11-38.
- Malafosse, D., Lerouge, A., & Dusseau, J.-M. (2001). Changements de registres sémiotiques en didactique de la physique : exemple de la loi d'Ohm. *Skhôle, Numéro Hors Série*.
- Marêché, J. (1998). Les épreuves de physique et de chimie de l'examen de trnsition "enseignement secondaire / enseignement supérieur" dans les différents pays européens. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 92, 743-775.
- Martin, J. (2002). Aux origines de la "science des examens" (1920-1940). *Histoire de l'éducation*, 94, 177-199.
- Martinand, J.-L. (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris: INRP.
- Martinand, J.-L. (2002). Apprendre à modéliser. In R. Toussaint (Ed.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences Recherches et pratiques* (pp. 47-68). Outremont (Québec): Les éditions logiques.
- McCloskey, M. (1983). L'intuition en physique. *Pour la science*, 68-76.
- McDermott, L. C. (1983). Critical Review of research in the domain of mechanics. In G. Delacôte, A. Tiberghien & J. Schwartz (Eds.), *Research on Physics Education, Proceedings of the First International Workshop, La Londe les Maures* (pp. 139-182). Paris: Editions du CNRS.
- McDermott, L. C. (1993). Guest Comment: How we teach and how students learn - A mismatch? *American Journal of Physics*, 61(4), 295-298.
- McDermott, L. C. (1998). Students' conceptions and problems solving in mechanics. In A. Tiberghien, L. Jossem & J. Barojas (Eds.), *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education: ICPE*. <disponible en ligne à <http://www.physics.ohio-state.edu/~jossem/ICPE/BOOKS.html> >
- McDermott, L. C., Rosenquist, M. L., & van Zee, E. H. (1987). Student difficulties in connecting graphs and physics: Examples from kinematics. *American Journal of Physics*, 55(6), 503-513.
- Méheut, M. (1997). Designing a learning sequence about a pre-quantative kinetic model of gases: the parts played by questions and by a computer-simulation. *International Journal of Science Education*, 19(6), 647-660.
- Méheut, M. (2004). Designing and validating two teaching-learning sequences about

- particle models. *International Journal of Science Education*, 26(5), 605-618.
- Méheut, M., & Chomat, A. (1990). Les limites de l'atomisme enfantin : l'expérimentation d'une démarche d'élaboration d'un modèle particulaire par des élèves de collège. *European Journal of Psychology of Education*, 5(4), 417-437.
- Méheut, M., & Psillos, D. (2004). Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, 26(5), 515-535.
- Méheut, M., Saltiel, E., & Tiberghien, A. (1985). Pupils' (11-12 year olds) conceptions of combustion. *European Journal of science education*, 7, 82-93.
- Meltzer, D. E. (2002). *Student learning of physics concepts: efficacy of verbal and written forms of expression in comparison to representational modes*. Paper presented at the Conference on Ontological, Epistemological, Linguistic and Pedagogical Considerations of, Language and Science Literacy: Empowering Research and Informing Instruction, University of Victoria, Victoria, British Columbia, Canada <disponible en ligne à http://www.physics.iastate.edu/per/talks/Victoria_paper.pdf >
- Meltzer, D. E. (2005). Relation between students' problem-solving performance and representational format. *American Journal of Physics*, 73(5), 463-478 <disponible en ligne à <http://www.physics.iastate.edu/per/articles/index.html> >
- Merle, P. (1998). *Sociologie de l'évaluation scolaire*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Meuret, D. (2003). Pourquoi les jeunes Français ont-ils à 15 ans des compétences inférieures à celles de jeunes d'autres pays ? *Revue Française de Pédagogie*(142), 89-104.
- Mildenhall, P. T., & Williams, J. S. (2001). Instability in students' use of intuitive and Newtonian models to predict motion: the critical effect of the parameters involved. *International Journal of Science Education*, 23(6), 643-660.
- Millar, R. (2003). Diagnosing pupils' understanding. Forces and motion 1-5. In *Department for Education and Skills (DfES), Strengthening teaching and learning of forces in Key Stage 3 science. Key Stage 3 National Strategy INSET pack*. London: DfES.
- Millar, R., & Hames, V. (2001a). *Consistency and variation in pupils' responses to diagnostic questions*. Paper presented at the Annual Conference of the British Educational Research Association, University of Leeds <disponible en ligne à <http://www.york.ac.uk/depts/educ/projs/publications.html> >
- Millar, R., & Hames, V. (2001b). *Using diagnostic assessment to improve students' learning in science : Some preliminary findings from work to develop and test diagnostic tools*. Paper presented at the Third Conference of the European Science Education Research Association (ESERA), Thessaloniki, Grece <disponible en ligne à <http://www.york.ac.uk/depts/educ/projs/publications.html> >
- Millar, R., & Hames, V. (à paraître). Using research to clarify learning goals and measure outcomes. In R. Millar, J. Leach, J. Osborne & M. Ratcliffe (Eds.), *Improving Subject Teaching: Research Lessons from Science Education TLRP Gateway book*. London: RoutledgeFalmer.

- Mokonsi, G. B. (2003). Le modèle de la généralisabilité : une théorie de la mesure en éducation. *Mesure et Evaluation en Education*, 26(1-2), 5-18.
- Nguyen, N.-L., & Meltzer, D. E. (2003). Initial understanding of vector concepts among students in introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 71(6), 630-638 <disponible en ligne à <http://www.physics.iastate.edu/per/articles/index.html>>
- Noizet, G., & Caverni, J.-P. (1978). *Psychologie de l'évaluation scolaire*. Paris: PUF.
- OCDE. (1999). *Mesurer les connaissances et les compétences des élèves : Un nouveau cadre d'évaluation*. Paris: OCDE.
- OCDE. (2003). *Cadre d'évaluation de PISA 2003 : Connaissances et compétences en mathématiques, lecture, science et résolution de problèmes*. Paris: OCDE <disponible en ligne à <http://213.253.134.29/oecd/pdfs/browseit/9603052E.PDF>>
- Palmer, D. (1994). *Students' conceptions of the forces acting on objects in motion*. Paper presented at the Conference of the Australian Association for Research in Education, Newcastle <disponible en ligne à <http://www.aare.edu.au/94pap/palmd94027.txt>>.
- Palmer, D. (1997). The effect of context on students' reasoning about forces. *International Journal of Science Education*, 19(6), 681-696.
- Palmer, D. H. (1998). Measuring contextual error in the diagnosis of alternative conceptions in science. *Issues in Educational Research*, 8(1), 65-76 <disponible en ligne à <http://education.curtin.edu.au/iier/iier68/palmer.html>>.
- Peasley, K. L., Rosaen, C. L., & Roth, K. J. (1993). *The role of oral and written discourse in constructing understanding in an elementary science class*. Paper presented at the annual meeting of the American Educational Research Association, Atlanta. cité dans Mason, L. (2001). Introducing talk and writing for conceptual change : a classroom study. *Learning and Instruction*, 11, 305-329.
- Pérès, J. (1953). *Mécanique générale*. Paris: Masson et Cie.
- Perrenoud, P. (1984). *La fabrication de l'excellence scolaire: du curriculum aux pratiques d'évaluation. Vers une analyse de la réussite, de l'échec et des inégalités comme réalités construites par le système scolaire*. Genève: Droz.
- Perrenoud, P. (1991). Pour une approche pragmatique de l'évaluation formative. *Mesure et évaluation*, 14(4), 49-81 <http://www.unige.ch/fapse/SSE/teachers/perrenoud/php_main/php_1991/1991_1912.html>
- Perrenoud, P. (1998a). From Formative Evaluation to a Controlled Regulation of Learning Processes. Towards a wider conceptual field. *Assessment in Education*, 5(1), 85-102 <disponible en ligne à http://www.unige.ch/fapse/SSE/teachers/perrenoud/php_main/php_1997/1997_1911.html>.
- Perrenoud, P. (1998b). *L'évaluation des élèves. De la fabrication de l'excellence à la régulation des apprentissages*. Bruxelles: De Boeck.
- Perrenoud, P. (2001). Évaluation formative et évaluation certificative, des postures définitivement contradictoires ? *Formation professionnelle suisse*, 4, 25-28 <disponible en ligne à

-
- http://www.unige.ch/fapse/SSE/teachers/perrenoud/php_main/php_2001/2001_2013.html
>
- Reif, F. (1987). Instructional design, cognition, and technology: applications to the teaching of scientific concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 24(4), 309-324.
- Roegiers, X. (2004). *L'école et l'évaluation Des situations pour évaluer les compétences des élèves*. Bruxelles: De Boeck.
- Rump, C., Jakobsen, A., & Clemmensen, T. (1997). *Improving Conceptual Understanding Using Qualitative Tests*. Paper presented at the 6th Improving Learning Symposium, Brighton.
- Savinainen, A. (2004). *High school students' conceptual coherence of qualitative knowledge in the case of the force concept*. University of Joensuu, Joensuu. <
http://joypub.joensuu.fi/publications/dissertations/savinainen_coherence/savinainen.pdf
>
- Schoultz, J., Saljö, R., & Wyndhamn, J. (2001). Conceptual knowledge in talk and text: What does it take to understand a science question? *Instructional Science*, 29(3), 213-236.
- Scriven, M. (1967). The methodology of evaluation. In R. W. Tyler, R. M. Gagné & M. Scriven (Eds.), *Perspectives of curriculum evaluation* (pp. 39-83). Chicago, IL: Rand McNally.
- Séjourné, A. (2001). *Conception d'un hypermédia et analyses de l'influence de l'organisation des contenus sur l'activité des élèves : Le cas de "Labdoc Son et Vibrations"*. Unpublished thèse en Sciences de l'éducation, Université Lumière Lyon 2, Lyon. <disponible en ligne à
http://demeter.univ-lyon2.fr:8080/sdx/theses/notice.xsp?id=lyon2.2001.sejourne_a-principal&id_doc
>
- Seufert, T. (2003). Supporting coherence formation in learning from multiple representations. *Learning and Instruction*, 13, 227-237.
- Shayer, M., & Wylam, H. (1981). The development of the concepts of heat and temperature in 10-13 year-olds. *Journal of Research in Science Teaching*, 18(5), 419-434.
- Shipstone, D. M., Rhoneck, C. V., Jung, W., Kaerquist, C., Dupin, J. J., Johsua, S., et al. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Educational Studies in Mathematics*, 10(3), 303-316.
- Song, J., & Black, P. (1993). The effect of task contexts on pupils' performance in science process skills. *International Journal of Science Education*, 13(1), 49-58.
- Taber, K. S. (2000). Multiple frameworks?: Evidence of manifold conceptions in individual cognitive structure. *International Journal of Educational Research*, 22(4), 399-417.
- Tamir, P. (1990). Justifying the selection of answers in multiple choice items. *International Journal of Science Education*, 12(5), 563-573.
- Tamir, P. (1998). Assessment and Evaluation in Science Education: Opportunities to Learn and Outcomes. In B. J. Fraser & K.G. Tobin (Eds.), *International Handbook of Science Education* (Vol. Part two, pp. 761-789). Dordrecht: Kluwer.
-

- Thornton, R. K., & Sokoloff, D. R. (1998). Assessing student learning of Newton's laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the Evaluation of Active Learning Laboratory and Lecture Curricula. *American Journal of Physics*, 66(4), 338-352.
- Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analysing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, 4, 71-87.
- Tiberghien, A. (2000). Designing teaching situations in the secondary school. In R. Millar, J. Leach & J. Osborne (Eds.), *Improving science education: The contribution of research* (pp. 27-47). Buckingham, UK: Open University Press.
- Tiberghien, A., & Vince, J. (2005). Etudes de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du français contemporain*, 10, 153-176.
- Toczek, M.-C., & Martinot, D. (2004). *Le défi éducatif*. Paris: Armand Colin.
- Toix, L. (2004). *Points de vue d'élèves de seconde sur les modèles et la modélisation en Sciences Physiques*. Université Lyon 2: Mémoire de DEA.
- Treagust, D. F. (1988). Development and use of diagnostic tests to evaluate students' misconceptions in science. *International Journal of Science Education*, 10(2), 159-169.
- Valentin, L. (1983). *L'univers mécanique*. Paris: Hermann.
- Van Heuvelen, A. (1991). Learning to think like a physicist: A review of research-based instructional strategies. *American Journal of Physics*, 59(10), 891-897.
- Van Heuvelen, A., & Zou, X. (2001). Multiple representations of work-energy processes. *American Journal of Physics*, 69(2), 184-194.
- Vergnaud, G. (1987). Les fonctions de l'action et de la symbolisation dans la formation des connaissances chez l'enfant. In J. Piaget, P. Mounoud & J.-P. Bronckart (Eds.), *Encyclopédie de la Pléiade Psychologie* (pp. 821-844). Paris: Gallimard. cité dans Lopes et al. (1999)
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10(2.3), 133-170.
- Vergnaud, G. (1993). Signifiants et signifiés dans une approche psychologique de la représentation. *Les sciences de l'éducation*, 1-3, 9-16. cité dans Lopes et al. (1999)
- Vergnaud, G. (1994). Homéomorphismes réel-représentation et signifié-signifiant. Exemples en Mathématique. *Didaskalia*, 5, 25-34.
- Vermersch, P. (1996). L'explicitation de l'action. *Cahiers de linguistique sociale*, 28-29, 113-120 <dispo. à <http://www.es-conseil.fr/GREX/textes%120vermersch/linguistes%120rouen.htm> >
- Viennot, L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris: Herman.
- Viennot, L. (1989). Bilans de forces et loi des actions réciproques Analyse des difficultés des élèves et enjeux didactiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 951-971.
- Viennot, L. (1998). Students' knowledge and learning. In A. Tiberghien, L. Jossem & J. Barojas (Eds.), *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education: ICPE*. <Disponible en ligne à

<http://www.physics.ohio-state.edu/~jossem/ICPE/BOOKS.html> >

Viennot, L., & Raison, S. (1999). Design and evaluation of a research-based teaching sequence: the superposition of electric field. *International Journal of Science Education*, 21(1), 1-16.

Vince, J., & Tiberghien, A. (2000). Simuler pour modéliser. Le cas du son. *Sciences et techniques éducatives*, 7(2), 333-366.

Vosniadou, S. (1994). Capturing and modelling the process of conceptual change. *Learning and Instructional Science*, 4, 45-69.

Vygotsky, L. (1997). *Pensée et Langage*. Paris: La Dispute.