

Faciliter l'apprentissage à partir d'exemples en situation de résolution de problèmes

Par Sandra NOGRY

Thèse de doctorat en Sciences cognitives

Mention psychologie

Dirigée par Alain MILLE

Présentée et soutenue publiquement le 5 décembre 2005

Devant un jury composé de : Remy VERSACE, Professeur de l'Université Lyon 2, Mireille BETRANCOURT, Professeur de l'Université de Genève, André DIDIERJEAN, Professeur de l'Université de Franche-Comté, Monique GRANDBASTIEN, Professeur de l'Université de Nancy 1, Alain MILLE, Professeur de l'Université Lyon 1, André TRICOT, Maître de conférences et HDR à l'IUFM de Toulouse.

Table des matières

Introduction . .	1
Partie 1 : Comment faciliter la mise en œuvre des processus impliqués dans l'apprentissage à partir d'exemples ? .	5
Introduction .	5
Chapitre 1 : Résolution de problèmes par analogie et apprentissage .	6
1.1. Nature des connaissances acquises en résolution de problème .	7
1.2. Raisonnement par analogie et processus d'apprentissage .	9
1.3. Bilan .	15
Chapitre 2 : Quelles conditions favorisent l'apprentissage à partir d'exemples ? . .	16
2.1. Théorie de la charge cognitive .	17
2.2. Favoriser l'apprentissage en manipulant la charge cognitive . .	19
2.3. Favoriser la mise en œuvre de processus de généralisation . .	26
2.4. Bilan .	35
Chapitre 3 : Induction de processus d'apprentissage et saillance des traits de structures . .	37
3.1. Présentation de l'étude de Gick et McGarry (1992) .	37
3.2. Présentation des expériences .	41
3.3. Discussion générale .	57
3.4. Bilan .	58
Chapitre 4 : Etude des effets conjugués de la tâche à réaliser et de la similarité entre problèmes sur les processus de généralisation .	59
4.1. Principe de l'expérience .	61
4.2. Méthode .	61
4.3. Résultats . .	65
4.4. Discussion .	66
4.5. Bilan .	68
Chapitre 5 : Discussion de la première partie . .	69
5.1. Résumé .	69

5.2. Perspectives . .	71
Partie 2 : Concevoir des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) qui facilitent l'acquisition de connaissances à partir d'exemples . .	75
Introduction .	75
Chapitre 6 : Quelles collaborations interdisciplinaires pour la conception des EIAH ? . .	77
6.1. Bref historique du domaine . .	77
6.2. Les problèmes soulevés par la conception des EIAH .	79
6.3. Quels fondements théoriques pour la conception des EIAH ? . .	80
Chapitre 7 : Le projet Ambre .	82
7.1. Les fondements du projet . .	82
7.2. Conception du projet AMBRE . .	87
7.3. Bilan .	91
Chapitre 8 : Recommandations pour la conception .	92
8.1. Présentation des problèmes-types . .	92
8.2. Résolution de nouveaux problèmes .	94
8.3. Diagnostic . .	97
8.4. Bilan des recommandations .	98
Chapitre 9 : Le logiciel Ambre-add .	100
9.1. Études en didactique des mathématiques .	100
9.2. La méthode à acquérir .	101
9.3. Description du logiciel AMBRE-add .	103
9.4. Bilan .	109
Chapitre 10 : Comment évaluer un EIAH ? . .	109
10.1. Évaluer l'utilisabilité .	110
10.2. Évaluer l'utilité . .	113
10.3. Bilan .	115
Chapitre 11 : Évaluation du logiciel Ambre-add .	116
11.1. Evaluation du logiciel en laboratoire . .	116
11.2. Evaluation de l'impact de AMBRE-add sur l'apprentissage .	121

11.3. Evaluation de l'adéquation de AMBRE-add à des élèves de CE2 .	139
11.4. Bilan des expériences et perspectives .	146
Chapitre 12 : Discussion de la seconde partie .	147
12.1. Conséquences de l'évaluation pour AMBRE-add . .	148
12.2. Rôle des théories et des données empiriques sur le fonctionnement cognitif pour la conception de ce projet ? . .	153
12.3. Quels enseignements tirer de ce travail pour le projet AMBRE ? . .	155
12.4. Quels enseignements pour l'évaluation des environnements d'apprentissage ? .	157
12.5. Perspectives . .	160
Discussion générale .	163
12.6. Résumé de nos travaux . .	163
12.6.1. Rappel des objectifs .	163
12.6.2. Résumé des contributions en psychologie cognitive .	164
12.6.3. Résumé des contributions dans le domaine des EIAH .	165
12.7. Limites de cette étude pluridisciplinaire .	165
12.8. Perspectives . .	168
12.8.1. Mieux comprendre la généralisation par adaptation .	168
Annexes . .	171
Annexe 1 : Classification des problèmes additifs représentée par des schémas .	171
Annexe 2 : Copies d'écran du logiciel Ambre-add .	172
<i>Présentation d'un problème prototypique .</i>	172
<i>Bilan des problèmes-type .</i>	173
<i>Présentation de l'énoncé du problème .</i>	174
<i>Etape de reformulation .</i>	175
<i>Etape de choix d'un problème-type . .</i>	176
<i>Etape d'adaptation . .</i>	177
<i>Etape de classement . .</i>	178
Annexe 3 : Copies d'écran du logiciel contrôle « reformulation-résolution » .	179
<i>Présentation de l'énoncé . .</i>	179

<i>Etape de reformulation du problème .</i>	180
<i>Etape de rédaction de la solution .</i>	181
<i>Bilan de la résolution .</i>	182
Annexe 4 : Copies d'écran du logiciel contrôle « résolution simple » .	183
<i>Présentation des problèmes-types .</i>	183
<i>Rédaction de la solution .</i>	184
<i>Bilan de la résolution du problème .</i>	185
<i>Tâche complémentaire : rechercher des informations dans un énoncé de problèmes .</i>	186
Annexe 5 : Test de « détection de similarités de structures » .	187
<i>Présentation de l'énoncé . .</i>	187
<i>Enoncés de problèmes à choisir .</i>	188
Annexe 6 : Exemples de problèmes présentés par le logiciel .	189
<i>Problème de type réunion .</i>	189
<i>Problème de type changement . .</i>	189
<i>Problème de type comparaison . .</i>	190
Annexe 7 : Exemples de problèmes présentés pendant les tests en classe .	190
<i>Exemples de problèmes faciles .</i>	190
<i>Problèmes difficiles proches .</i>	190
<i>Problèmes difficiles éloignés . .</i>	191
Annexe 8 : Liste des observables utilisés pour préparer l'observation des utilisateurs de Ambre-add en laboratoire . .	191
Annexe 9 : Questionnaire sur l'utilisation de Ambre-add . .	193
Annexe 10 : Fiche de séance . .	194
Annexe 11 : Grille d'observation individuelle .	195
Annexe 12 : Test de compréhension des schémas . .	196
Annexe 13 : Exemples de problèmes présentés par Ambre-add dans expérience en CE2 . .	197
Annexe 14 : Questions sur l'utilisation de Ambre-add proposé aux élèves de CE2 .	198
Bibliographie . .	203

Introduction

Lorsqu'une personne est confrontée à un nouveau problème, elle recherche souvent en mémoire un problème proche déjà rencontré afin de s'en inspirer pour trouver une solution. De même, lorsque cette personne, en situation d'apprentissage, doit résoudre un problème, elle peut se référer à des problèmes déjà résolus, les analyser, et les utiliser pour résoudre des problèmes similaires. L'analyse des exemples et la résolution de problèmes par analogie la conduisent alors à augmenter son habileté à résoudre ce type de problèmes. Cette forme d'apprentissage soulève différentes questions. Face aux problèmes, quelles activités sont mises en œuvre par les apprenants ? Quelle est la nature des connaissances ainsi construites ? Sous quelles conditions ces connaissances sont-elles construites et utilisées ?

Différentes recherches sur l'apprentissage à partir d'exemples ont conduit à mettre en évidence certains processus qui permettent d'acquérir des connaissances. Différents facteurs favorisant ou inhibant cette forme d'apprentissage ont également été identifiés. Toutefois, suivant les études, un même facteur semble avoir des effets assez variables. En outre, leur rôle sur les mécanismes d'apprentissage est encore souvent mal connu.

L'objectif général poursuivi ici est d'approfondir l'étude des conditions qui facilitent l'acquisition de connaissances à partir d'exemples.

Si ce sujet d'étude présente un intérêt théorique, il présente également un certain intérêt pratique. Une meilleure compréhension des conditions qui facilitent l'apprentissage permettrait d'orienter la conception de situations d'apprentissage, ceci dans le cadre de l'enseignement « classique » mais aussi dans le cadre d'environnements informatiques

destinés à favoriser l'apprentissage. En effet, avec le développement des technologies pour l'éducation, il est possible de concevoir des environnements informatiques qui proposent des situations d'apprentissage adaptées à chaque apprenant.

Aussi, notre objectif est d'une part d'étudier expérimentalement les conditions qui favorisent l'apprentissage à partir d'exemples et d'autre part de concevoir et d'évaluer un environnement informatique destiné à favoriser l'apprentissage à partir d'exemples.

Ce second objectif est abordé dans le cadre du projet AMBRE (Apprentissage de Méthodes Basé sur le Raisonnement à partir de l'Expérience). Ce projet vise à concevoir des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) qui proposent d'analyser des exemples et de résoudre des problèmes par analogie afin que l'apprenant acquière des connaissances abstraites. Pour favoriser la résolution de problèmes par analogie, ce projet propose de s'appuyer sur le paradigme du Raisonnement à Partir de Cas (RàPC), qui modélise le raisonnement analogique intra-domaine en décomposant la résolution de problèmes en plusieurs étapes. Les EIAH conçus suivant ce principe doivent guider l'apprenant lorsqu'il résout de nouveaux problèmes en l'amenant à suivre les différentes étapes du cycle de raisonnement à partir de cas. L'objectif du projet AMBRE est de montrer que ce paradigme peut fonder une stratégie d'apprentissage pour acquérir de nouvelles connaissances. Au sein de ce projet, notre objectif consiste à identifier les conditions nécessaires pour favoriser l'apprentissage à partir d'exemples afin d'orienter les choix de conception.

Nous pensons que pour réaliser un EIAH véritablement en adéquation avec les besoins de l'utilisateur, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des mécanismes d'apprentissage de l'apprenant, de la nature des processus mis en jeu, et des conditions de déclenchement des différents mécanismes d'apprentissage.

La première partie de cette thèse présente une synthèse des résultats de psychologie cognitive sur l'apprentissage à partir d'exemples et décrit deux études que nous avons réalisées afin de mieux comprendre les conditions qui facilitent cet apprentissage. Dans cette partie, nous décrivons plus particulièrement les processus impliqués dans l'acquisition de connaissances et nous conduisons différentes expériences afin de montrer que certains facteurs permettent de déclencher la mise en œuvre de ces processus.

La seconde partie développe les travaux réalisés dans le cadre du projet AMBRE. Nous y présentons les recommandations que nous avons proposées à partir des études théoriques sur l'apprentissage à partir d'exemples et la manière dont ces recommandations ont été appliquées pour la conception de l'EIAH AMBRE-add, une application du principe de AMBRE aux problèmes additifs. Nous décrivons également comment nous avons évalué ce logiciel afin de mesurer l'impact du principe de AMBRE sur l'apprentissage.

La première partie du document est découpée en cinq chapitres. Le premier chapitre met en évidence les différentes connaissances qu'un apprenant peut acquérir et les différents processus dont il dispose pour acquérir ces connaissances lorsqu'il analyse des exemples et résout des problèmes par analogie. Ces processus ne sont pas nécessairement mis en œuvre lors d'une résolution de problème par analogie.

Dans le second chapitre, nous cherchons à comprendre en quoi certains facteurs inhibent ou au contraire favorisent l'acquisition de connaissances à partir d'exemples. Nous exposons d'abord la théorie de la charge cognitive proposée par Sweller qui montre que certaines conditions provoquent une surcharge cognitive. Puis nous faisons l'hypothèse que certains facteurs peuvent influencer l'acquisition de connaissances non pas en réduisant la charge cognitive, mais en déclenchant la mise en œuvre de processus de généralisation.

Les chapitres 3 et 4 décrivent les expériences que nous avons menées qui visent à tester cette hypothèse et à identifier plus précisément des conditions qui conduisent au déclenchement de ces processus de généralisation. Dans le dernier chapitre, nous discutons des résultats obtenus dans cette première partie et des perspectives qui en résultent.

Dans la deuxième partie, composée de 6 chapitres, nous présentons nos contributions au projet AMBRE. Le chapitre 6 présente le domaine de recherche des EIAH et aborde la question de l'utilisation des théories et données empiriques pour la conception des EIAH. Le chapitre 7 décrit le projet AMBRE dans lequel s'inscrit notre travail. Le chapitre 8 décrit les recommandations que nous proposons, qui sont issues d'une revue de littérature sur l'apprentissage à partir d'exemples. Dans le chapitre 9, nous présentons le logiciel AMBRE-add conçu suivant le principe du projet AMBRE en intégrant les recommandations proposées dans le chapitre précédent. Les chapitres 10 et 11 abordent la question de l'évaluation des EIAH et présentent les différentes évaluations de AMBRE-add. Enfin, le dernier chapitre de cette partie est consacré à la discussion des différents résultats obtenus et de la démarche suivie dans ce projet.

Ce document se conclut par une discussion générale qui résume les différentes contributions de cette thèse, discute des intérêts et des limites de la démarche suivie et présente quelques perspectives de recherche issues de ce travail.

Si la seconde partie s'appuie sur des concepts et des données empiriques présentées dans la première partie, ces deux parties peuvent être lues séparément.

Partie 1 : Comment faciliter la mise en œuvre des processus impliqués dans l'apprentissage à partir d'exemples ?

Introduction

Une des questions fondamentales en psychologie cognitive concerne la compréhension des mécanismes d'apprentissage en situation de résolution de problèmes. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'acquisition de connaissances résultant de l'utilisation des problèmes déjà rencontrés afin de résoudre un nouveau problème.

Ce thème de recherche pose différentes questions. Quelles connaissances sont construites par l'apprenant ? Quels processus permettent de construire ces connaissances ? Quelles sont les conditions qui sont les plus favorables à cet apprentissage ?

Différents domaines ont abordé ces questions. Les recherches sur le raisonnement par analogie ont étudié les différents mécanismes qui permettent de construire des connaissances lorsqu'un problème est résolu en s'aidant d'un problème rencontré auparavant (Reeves et Weisberg, 1994, pour une revue de questions). Ces recherches

ont identifié différents processus de généralisation de connaissances que les sujets peuvent mettre en œuvre face aux problèmes (voir Didierjean, 2001, pour une revue de questions).

Parallèlement, d'autres études ont porté sur les conditions qui facilitent l'apprentissage à partir d'exemples. Celles-ci ont identifié différents modes de présentations et différentes activités qui facilitent cette forme d'apprentissage. Néanmoins, les liens entre le mode de présentation des exemples et les progrès observés mis en évidence à travers ces différentes études semblent assez complexes.

De notre point de vue, mieux comprendre les conditions qui favorisent l'apprentissage à partir d'exemples passe par une mise en lien des travaux portant sur les processus d'apprentissage et des études portant sur les conditions de présentation du matériel sources de progrès. Nous faisons l'hypothèse que certains facteurs relatifs aux activités réalisées sur les problèmes et à leur mode de présentation peuvent déclencher la mise en œuvre de ces processus de généralisation.

L'objectif poursuivi ici est donc de montrer d'une part que certains facteurs peuvent induire la mise en œuvre de processus de généralisation et d'autre part qu'il est possible de manipuler ces facteurs pour déclencher ces processus.

Dans cette partie, composée de cinq chapitres, nous présentons tout d'abord une revue des études sur les processus d'apprentissage et les conditions sources de progrès. Nous présentons ensuite les deux études que nous avons réalisé afin d'étudier les conditions susceptibles de déclencher la mise en œuvre d'un processus de généralisation. Le premier chapitre relate les travaux portant sur les connaissances qui peuvent être acquises au cours de la résolution de problèmes par analogie, et décrit les différents processus qui semblent pouvoir permettre d'acquérir ces connaissances. Le second chapitre traite plus particulièrement des conditions qui facilitent l'apprentissage à partir d'exemples. Dans ce chapitre, nous décrivons d'abord la théorie de la charge cognitive (Sweller, 1988 ; 1994 ; 1999), qui montre que certains facteurs nuisent à l'apprentissage en ce qu'ils créent une surcharge cognitive. Puis nous présentons un ensemble d'études qui portent sur des facteurs qui semblent jouer un rôle dans la mise en œuvre des processus de généralisation. Le chapitre 3 décrit quatre expériences destinées à étudier le rôle de la saillance des traits de structure d'un problème dans la mise en œuvre des processus de généralisation. Le chapitre 4 présente une expérience réalisée pour étudier l'effet conjugué des activités réalisées et de la similarité entre problèmes sur le déclenchement des processus de généralisation. Enfin, dans le dernier chapitre, nous discutons des résultats obtenus et de notre contribution à la meilleure compréhension des conditions qui facilitent la mise en œuvre des processus d'apprentissage en situation de résolution de problèmes par analogie.

Chapitre 1 : Résolution de problèmes par analogie et apprentissage

Différentes études ont montré que résoudre des problèmes en adaptant des problèmes déjà rencontrés peut être source de progrès. Pour mieux comprendre ce qui fait progresser les apprenants, il est important de mettre en évidence les connaissances qu'ils acquièrent lorsqu'ils progressent. Différentes études se sont attachées à caractériser ces connaissances en comparant les connaissances de novices et d'experts afin de décrire l'évolution des connaissances avec l'acquisition d'une expertise.

Comment ces connaissances sont-elles acquises ? Les études sur le raisonnement par analogie ont mis en évidence différents processus qui permettent d'acquérir ces différents types de connaissances.

Dans ce chapitre, nous décrivons tout d'abord les différentes connaissances qui peuvent être acquises lorsque nous développons une expertise dans un domaine. Dans un second temps, nous discutons des différents processus dont l'apprenant dispose pour acquérir de nouvelles connaissances lorsqu'il résout des problèmes par analogie.

1.1. Nature des connaissances acquises en résolution de problème

Lorsqu'on devient expert dans un domaine, ou, tout au moins, plus expert, quelles sont les connaissances qui sont acquises ? De nombreux travaux ont étudié cette question en comparant les connaissances dont disposent des novices et des experts dans différents domaines. Une catégorie de différences tient au niveau d'abstraction des connaissances. Lorsque les novices traitent des situations nouvelles, ils s'attachent essentiellement à des informations superficielles telles que des objets spécifiques ou des termes utilisés (Chi, Feltovich et Glaser, 1981 ; Chi, Glaser et Rees, 1982 ; Schoenfeld et Herrmann, 1982 ; Silver, 1979 ; 1981) alors que les experts disposent de connaissances plus abstraites pour traiter ces situations. Ce point est bien illustré par l'étude princeps de Chi et al. (1981). Dans cette étude, les auteurs donnent à des sujets experts et novices des problèmes de physique à catégoriser. Les résultats de cette expérience montrent que les novices catégorisent plutôt les problèmes suivant leurs traits de surface tandis que les experts catégorisent plutôt selon les traits de structure du problème. Selon la définition la plus fréquemment adoptée (cf. Bassok et Holyoak, 1989 ; Holyoak et Koh, 1987 ; Ross, 1987 ; 1989a, 1989b), les traits de surface sont ceux dont la modification n'a pas d'influence sur la réalisation du but (par exemple l'habillage du problème, les termes employés, les objets utilisés, etc.), tandis que les traits de structure sont ceux dont la modification a une influence sur la réalisation du but. Ce résultat est interprété par les auteurs comme l'existence de connaissances plus générales chez les experts.

Les connaissances générales dont disposent les experts seraient organisées sous forme de schémas (notion proposée par Bartlett, 1932 ; puis réintroduite par Minski, 1975 et Schank et Abelson, 1977). La construction d'un schéma est vue comme l'élaboration de connaissances générales bien structurées à partir de situations particulières. Le schéma est une structure de connaissance qui allie des éléments fixes et des variables, ce qui permet de résoudre des situations diverses indépendamment de leurs spécificités (traits de surfaces ou habillage). Cette structure est opératoire : elle contient les plans pour traiter des informations correspondant à un type de situations dans un domaine restreint. D'après les recherches qui portent sur la résolution de problèmes, un schéma relatif à un

ensemble de problèmes serait une connaissance « dégagée » des éléments contextuels du ou des problèmes déjà rencontrés, constituée d'une suite de buts et sous-butts et de moyens permettant de passer de l'état initial du problème (l'énoncé) à l'état final (une solution du problème), compte tenu des contraintes du problème (voir Rumelhart et Norman, 1981). Une fois qu'une structure de connaissance « décontextualisée » a été construite, les sujets peuvent l'appliquer aux problèmes appartenant à la catégorie dont relève le schéma en vue de les résoudre.

Les résultats obtenus par Chi et al. (1981) ont été reproduits dans de nombreux domaines. La constitution de schémas semble donc être une caractéristique importante de l'acquisition de l'expertise dans tous les domaines (Cooke, Atlas, Lane et Berger, 1993 ; Gobet & Simon, 1996a ; 1996b ; voir Gobet, 1998 pour une revue de question).

Cependant, si les experts disposent de schémas qui leur permettent d'identifier la structure d'un problème, ils semblent également prendre en compte des éléments de surface. Ainsi, Chi et al. (1981) montrent que si les experts catégorisent d'abord les problèmes suivant leurs traits de structure, ils peuvent ensuite affiner leur catégorisation en prenant en compte les éléments de surface. Dans le même sens, Blessing et Ross (1996) montrent que des experts en mathématiques résolvent plus vite des problèmes pour lesquels ils disposent d'un schéma si leur habillage est caractéristique de cette catégorie de problèmes. Les auteurs en déduisent que les schémas dont disposent les experts pourraient contenir des connaissances contextuelles.

En outre, d'après les travaux portant sur l'expertise au jeu d'échec, les experts stockent également en mémoire un grand nombre de situations spécifiques (voir Didierjean, Ferrari et Marmèche, 2004, pour une revue de question). Ainsi, Chase et Simon (1973) réalisent une expérience dans laquelle on présente aux sujets (novices ou experts au jeu d'échec) une configuration sur un échiquier. Les sujets doivent ensuite reproduire cette configuration sur un autre échiquier. Cette étude montre que les experts rappellent un plus grand nombre de pièces que les novices si la configuration présentée est issue d'une partie réelle. En revanche, si la configuration est aléatoire, la différence entre novices et experts est atténuée. Les auteurs en déduisent que les experts disposent donc d'un grand nombre de configurations spécifiques en mémoire. Gobet et Simon (1996a) appuient cette interprétation en montrant qu'une modification de la configuration des pièces qui n'affecte pas la structure du jeu (par une symétrie axiale), modifie tout de même les performances de rappel des experts ; les experts sont donc sensibles aux variations perceptives des configurations. Les connaissances qu'ils stockent sont donc très liées au contexte.

Ainsi, devenir expert dans un domaine ne consiste pas uniquement à élaborer des connaissances abstraites et décontextualisées, mais également à mémoriser des connaissances plus spécifiques, très liées au contexte (Chase et Simon, 1973 ; Gobet et Simon, 1996a ; Kolodner, 1993 ; Reingold, Charness, Pomplun et Stampe, 2001 ; Ross, 1987 ; 1989 ; Schank, 1982 ; voir Didierjean, Ferrari et Marmèche, 2004, pour une revue de question).

Dès lors, deux questions se posent : quels sont les processus impliqués dans l'élaboration d'un schéma ? Et pourquoi certaines situations spécifiques sont-elles mieux

retenues que d'autres ?

Dans la section suivante, nous traitons de ces deux questions dans le cadre de la résolution de problèmes par analogie. Nous présentons les différents travaux qui permettent d'expliquer comment l'analyse de problèmes résolus et la résolution de problèmes par analogie peuvent permettre de construire des connaissances abstraites ou de stocker des connaissances spécifiques.

1.2. Raisonnement par analogie et processus d'apprentissage

Le raisonnement par analogie peut être défini comme « un transfert de connaissance d'une situation à une autre », « ce qui permet de rendre la nouveauté familière en la reliant à un savoir antérieur » (Gick et Holyoak, 1983, p. 1 et 2). Résoudre un problème par analogie consiste donc à se référer à un problème déjà rencontré (source) et à l'utiliser pour trouver la solution du problème à résoudre (cible).

De très nombreuses recherches ont étudié le raisonnement par analogie et ont tenté de modéliser les mécanismes en jeu dans ce type de raisonnement (Bassok, 1990 ; Bassok et Holyoak, 1989 ; Gick et Holyoak, 1980 ; 1983 ; Falkenhainer, Forbus et Gentner, 1989 ; Holyoak, 1984 ; Holyoak et Thagard, 1989 ; Hummel et Holyoak, 1997 ; Keane, Ledgeway et Duff, 1994 ; voir Sander, 2000 pour une synthèse). Ces recherches ont montré que le raisonnement par analogie peut être source d'apprentissage en ce qu'il peut parfois conduire les sujets à élaborer des connaissances abstraites.

Les liens entre analogie et schémas sont bien mis en évidence dans les recherches princeps de Gick et Holyoak (1980, 1983). Dans ces études, les sujets étudiaient dans une première phase un problème source et sa solution, puis devaient résoudre, dans une seconde phase, un problème cible analogue au problème source au sens où il relève des mêmes principes généraux de résolution.

Par exemple, dans la première phase, les sujets devaient traiter le problème suivant (les traductions des textes originaux sont empruntées à M.D. Gineste, 1997) :

« Un général veut que son armée enlève une place forte qui est aux mains d'un dictateur et située au coeur d'un pays. Plusieurs routes conduisent à la forteresse, mais elles sont toutes minées. On ne peut donc passer sur ces routes que par petits groupes sinon les mines peuvent sauter. Le général veut que son armée entière parvienne à la forteresse afin de réussir la prise de la forteresse. Comment faire? »

Si les sujets ne trouvaient pas spontanément la solution attendue, celle-ci leur était donnée.

« La solution consiste à diviser l'armée en petits groupes, à leur faire emprunter en même temps toutes les routes d'accès et à les faire converger vers la forteresse de telle sorte qu'ils arrivent en même temps au pied de celle-ci. ».

Dans une deuxième phase, les sujets devaient résoudre un problème qui met en jeu la destruction d'une tumeur par des rayons laser (problème emprunté à Duncker, 1945). Le problème est le suivant :

« Un médecin reçoit un malade avec une tumeur maligne à l'estomac. Il est

impossible d'opérer ce patient mais si on ne détruit pas la tumeur, le patient mourra. On peut utiliser des rayons pour détruire la tumeur. Si les rayons atteignent la tumeur tous en une seule fois avec une intensité suffisamment forte, on détruira la tumeur. Malheureusement, avec cette intensité on détruira également des tissus sains. A une plus faible intensité, les rayons seront moins dangereux pour les tissus sains mais inefficaces pour la tumeur. Quelle solution proposez-vous pour détruire la tumeur sans détruire les tissus sains? »

La solution "analogique" attendue est celle-ci :

« Faire converger des rayons de faible intensité sur la tumeur, ce qui sera suffisant pour la détruire, sans endommager pour autant les tissus sains. »

Gick et Holyoak (1980, 1983) mettent en évidence les résultats suivants : en l'absence d'indication de l'existence d'une analogie, il y a très peu de transfert spontané entre la source et la cible (voir aussi Spencer et Weisberg, 1986). En revanche, lorsque les sujets sont informés de l'existence d'une analogie, les sujets réussissent mieux le problème cible que ceux d'un groupe contrôle non informé (75% de réussite contre 10%). Par ailleurs, si l'on fournit au sujet, en plus du problème de la forteresse, une deuxième situation source qui partage le même schéma de résolution, le pourcentage de transfert spontané sur la cible augmente alors considérablement, et ce d'autant plus que les situations sources fournies sont sémantiquement éloignées.

Pour expliquer ces résultats, les auteurs font l'hypothèse qu'un problème peut être résolu par analogie uniquement si une connaissance abstraite, un schéma, est construit. Pour résoudre le problème de la tumeur, les apprenants doivent donc avoir construit une représentation abstraite, le schéma de convergence (Figure 1).

Etat initial

But : Utiliser une force pour détruire une cible centrale

Ressources : La force est suffisamment grande.

Opérateurs : Réduire l'intensité de la force, déplacer la source de la force, appliquer la force.

Contraintes : Impossibilité d'appliquer la force sans dommage par un seul trajet.

Plan de solution : Appliquer des forces de faible intensité par des trajets multiples en même temps.

Conséquence : Destruction de la cible par la force.

Figure 1 : Représentation du schéma de convergence

Cette représentation ne contient que des termes généraux recouvrant les termes spécifiques utilisés dans les situations sources et cibles. L'élaboration d'un tel schéma serait une condition préalable au transfert analogique. Une question attenante au rôle des schémas dans le transfert concerne la mise en évidence des différents processus permettant d'acquérir des schémas.

1.2.1. Elaborer un schéma

Il semble que deux catégories de processus peuvent permettre d'élaborer à partir des situations sources (voir Cauzinille-Marmèche et Didierjean, 1999 pour une revue de

question) : les processus inductifs et les processus explicatifs.

PROCESSUS INDUCTIFS

L'un des processus de généralisation le plus étudié en psychologie cognitive consiste à détecter les similitudes entre plusieurs situations qui partagent une structure commune de résolution (problèmes isomorphes) (Bassok, 1990 ; Bassok et Holyoak, 1989 ; Cummins, 1992 ; Gick et Holyoak, 1983) (Figure 2). Face à des problèmes isomorphes, la mise en œuvre des activités de détection de similitudes peut permettre de dégager la structure commune à ces situations. Cummins (1992) montre ainsi que face à plusieurs exemples isomorphes, on observe davantage de généralisation lorsque les participants de l'expérience sont incités par des questions à comparer les exemples plutôt que lorsqu'ils sont incités à étudier chacun des exemples individuellement. Notons que si ce type de raisonnement inductif peut permettre de détecter de manière active et consciente ce qui est commun à deux situations structurellement proches (Catrambone et Holyoak, 1989 ; Reeves et Weisberg, 1994), il semble également que l'homme puisse être sensible à la présence de régularités de manière automatique (Anderson, Kline et Beasley, 1979 ; Carbonell, 1983 ; Michalski, 1983), voire peut-être sans que la connaissance élaborée soit accessible à la conscience (Reber, 1989).

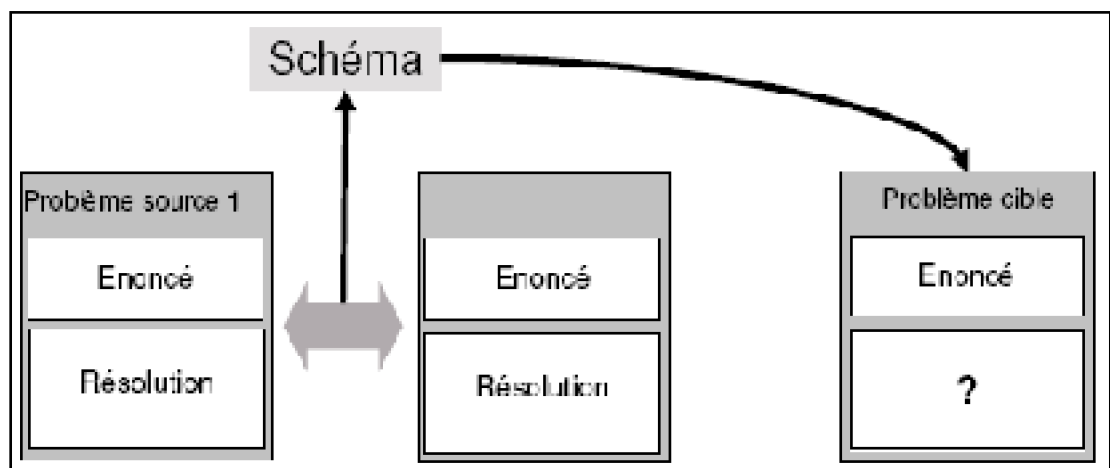


Figure 2 : Schématisation de la généralisation par détection de similitudes

Si la détection de similitudes est le processus privilégié dans la plupart des modélisations en psychologie, il n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes. Une difficulté importante est la distinction entre ce qui est important et ce qui l'est moins. En effet, la détection de similitudes ne permet pas nécessairement de faire la différence entre les éléments qui jouent un rôle causal dans une situation et les autres éléments.

Afin d'illustrer les limites de la détection de similitudes Ahn, Brewer et Mooney (1992) s'appuient sur une modélisation décrite par DeJong et Mooney (1986). Dans cet article, ils expliquent qu'un système informatique d'abstraction de connaissances fondé sur la détection de similitudes à qui on ferait lire dix histoires de kidnapping dans lesquels le kidnappeur porte toujours un blue-jean construirait un schéma de kidnapping où « porter un blue-jean » est un élément clé. L'utilisation de ce processus peut donc donner de

l'importance à des éléments qui ont une fréquence d'occurrence élevée, même s'ils étaient de l'ordre du détail pour le déroulement des histoires.

L'activité de construction d'un schéma abstrait ne consiste sans doute pas simplement à dégager des régularités. D'autres processus de généralisation semblent pouvoir être mis en oeuvre.

PROCESSUS EXPLICATIFS

Pour construire une représentation abstraite, il n'est pas nécessaire de comparer deux situations. Un schéma peut être construit à partir d'un seul exemple à travers la mise en oeuvre de processus explicatifs (Figure 3). Une condition nécessaire semble alors être que le sujet possède assez de connaissances sur le domaine en jeu, qu'il puisse déjà en quelque sorte se référer à une « théorie » du domaine, même si celle-ci est incomplète. Cette approche, dite « approche basée sur l'explication » (EBL, « *explanation-based-learning* ») ou « généralisation justifiée » a été largement développée en intelligence artificielle (cf. DeJong et Mooney, 1986 ; Mitchell, Keller et Kedar-Cabelli, 1986 ; voir Ellman, 1989 pour une revue de question) et différents systèmes ont été conçus suivant ce principe. Ces systèmes s'appuient sur la « théorie » du domaine dont ils disposent afin d'expliquer en quoi l'exemple analysé est représentatif du domaine (ou du concept) étudié. Cette activité de recherche d'explication à propos d'un cas particulier enrichit en retour la théorie du domaine, en l'explicitant, en la rendant plus intelligible, ou plus générale. Elle conduit à des généralisations argumentées, ce qui évite a priori l'abstraction de traits non pertinents (qui pourraient être sélectionnés dans une approche purement inductive où seules des corrélations sont détectées).

Pour vérifier la validité psychologique de cette approche, Ahn, Brewer et Mooney (1992) ont mené plusieurs expérimentations. Dans ces études, les sujets doivent interpréter un texte présentant une situation particulière (une cérémonie supposée se dérouler dans une tribu indienne), en disposant ou non d'informations préalables (sur les règles régissant les relations entre les membres de la tribu). Les résultats montrent que lorsque les sujets disposent d'informations préalables, ils sont capables d'élaborer un schéma abstrait de la situation spécifique traitée, et de l'argumenter (l'un des tests utilisés par les auteurs consiste à demander aux sujets de juger de la véracité d'un certain nombre de propositions). On dispose cependant de très peu de résultats expérimentaux allant dans ce sens. Signalons la recherche de Brown et Kane (1988), menée auprès d'enfants de quatre ans, située dans ce même cadre de l'EBL. L'un des concepts étudiés est celui du mimétisme animal. On indique aux enfants le principe général du mimétisme, puis on leur présente comment un animal particulier peut se défendre, en ne commentant la situation qu'en des termes spécifiques (donc sans référence au principe général). Les enfants doivent ensuite résoudre un problème de transfert où ils doivent imaginer comment tel autre animal pourrait se défendre. Les résultats montrent que les enfants transfèrent mieux quand ils disposent du principe général que dans le cas contraire, mais ils montrent surtout que le transfert est facilité quand il est demandé aux enfants d'expliquer en quoi le cas particulier illustre le principe général.

Expliquer en quoi un exemple unique est représentatif des problèmes de sa classe

facilite donc la construction d'un schéma (Brown et Kane, 1988) si l'apprenant peut s'appuyer sur une base de connaissances élémentaires déjà connues (Ahn, Brewer et Mooney, 1992).

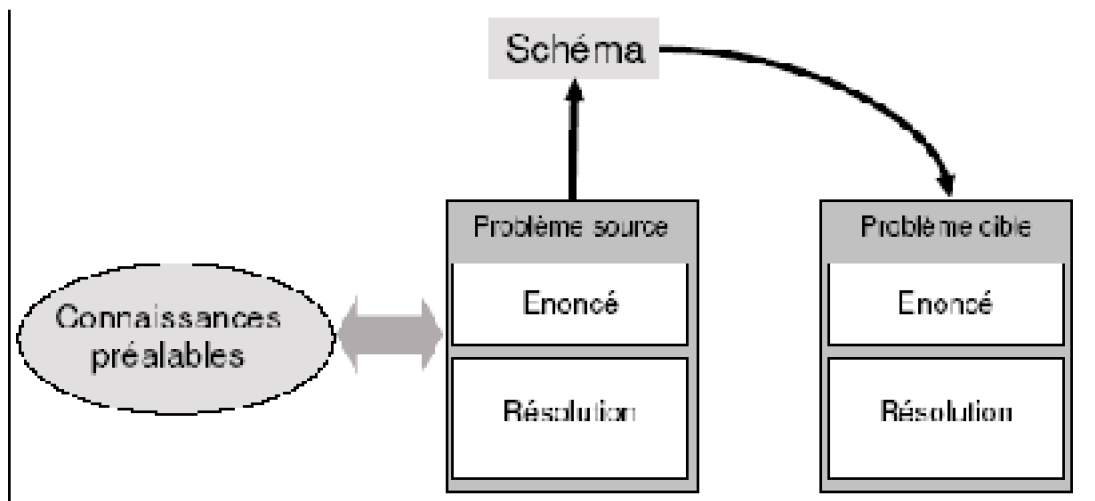


Figure 3 : Schématisation de la généralisation issue de processus explicatifs

1.2.2. Mémoriser des connaissances spécifiques

Comme nous l'avons présenté précédemment, d'après les recherches principes de Gick et Holyoak (1980, 1983), raisonner par analogie nécessite d'élaborer une structure abstraite de connaissance (un schéma) à partir de la (des) source(s) puis de projeter ce schéma sur la cible pour la résoudre.

Il existe néanmoins une autre approche du raisonnement par analogie : le raisonnement à partir de cas (« *Case-Based-Reasoning* »). Selon cette approche, le problème cible est résolu par adaptation de cas particuliers sans faire appel à des structures abstraites de représentation des connaissances. Cette approche a d'abord été développée en intelligence artificielle (Kolodner, 1993, pour des revues de question) en s'appuyant sur des études en psychologie (cf. Schank, 1982 ; 1999). Par la suite, différentes données empiriques ont montré sa validité psychologique. Ainsi, un ensemble de résultats en psychologie cognitive montre que les sujets, en situation de résolution de problèmes, peuvent avoir recours à l'évocation et à l'adaptation de cas ou épisodes spécifiques (Reed, 1987 ; 1989 ; Reed et Bolstad, 1991 ; Ross, 1984 ; 1987 ; 1989a ; 1989b ; Didierjean et Cauzinille-Marmèche, 1998 ; Didierjean, Cauzinille-Marmèche et Savina, 1999). Si ce type de raisonnement est le mode de raisonnement privilégié des novices (Reed, 1987 ; 1989 ; Reed et Bolstad, 1991), c'est aussi un mode de raisonnement économique et couramment utilisé par les experts (Blessing et Ross, 1996 ; Kolodner, 1993 ; Schank, 1982 ; 1999) (voir Didierjean, 2001 pour une revue de questions).

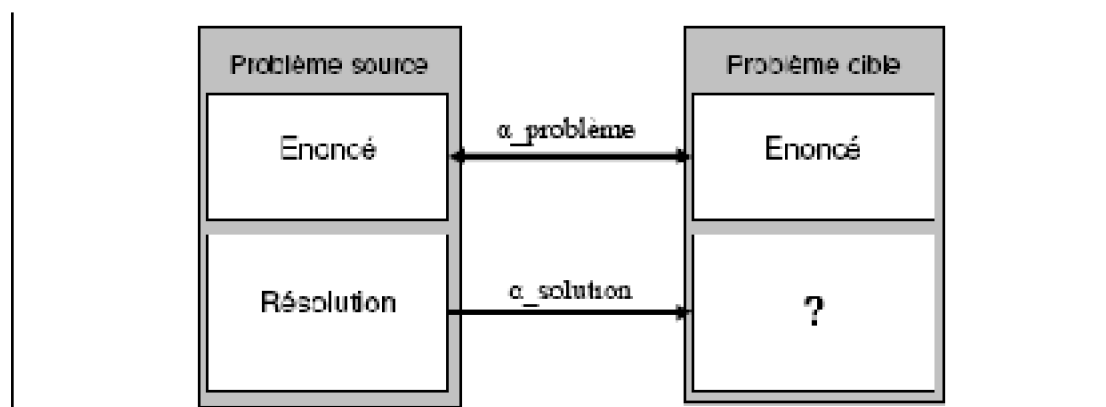


Figure 4 : Schématisation du raisonnement à partir de cas.

Ce schéma signifie : connaissant la ressemblance entre les deux problèmes ($\alpha_{\text{problème}}$), et la manière de résoudre le problème source, quelle est la solution du problème cible ? (inspiré de Fuchs, Lieber, Mille et Napoli, 1999)

Raisonnement à partir de cas peut conduire à acquérir de nouvelles connaissances. En effet, cet forme de raisonnement peut conduire l'apprenant à mémoriser le problème qu'il vient de résoudre en stockant cette situation spécifique à un faible niveau d'abstraction. Notons que les facteurs qui déterminent qu'une situation spécifique sera davantage mémorisée qu'une autre sont à ce jour assez méconnus. Un de ces facteurs semble être la difficulté rencontrée par les sujets lors de la résolution (Didierjean, Cauzinille-Marmèche et Savina, 1999 ; Gick et McGarry, 1992 ; Patalano et Seifert, 1994 ; Johnson et Seifert, 1992) ; les situations ayant engendré des difficultés seraient mémorisées de manière privilégiée. Dans cette optique, certains travaux sur le raisonnement à partir de cas en intelligence artificielle mettent l'accent sur la notion d'« attente déçue » comme critère de sélection des cas à stocker dans leur base de cas. Dans ces systèmes, l'important est de stocker en mémoire les « bonnes » situations, des situations « nouvelles » qui seront utiles par la suite. Pour cela, certains systèmes de raisonnement à partir de cas (Figure 4) (voir pour des exemples le système JUDGE (Bain, 1986) décrit par Riesbeck et Schank, 1989, ou le système CHEF, Hammond, 1990), lorsqu'ils sont confrontés à une situation, tentent d'anticiper les étapes à venir. Lorsqu'une étape ne correspond pas à ce qui est attendu, l'étape ayant occasionné une « attente déçue » va être mémorisée pour une réutilisation ultérieure. De même, lorsque l'apprenant rencontre des difficultés ou se trouve dans une impasse, il mémorise davantage cette situation (voir pour des mises en évidence expérimentales de ce type de phénomènes, De Graef, Christaens et d'Ydewalle, 1990 ; Hudson, 1988 ; Hudson, Fivush et Kuebly, 1992 ; Patalano et Seifert, 1994). Ainsi, les situations ayant engendré des difficultés et des attentes déçues pourraient être celles qui sont le mieux mémorisées.

1.2.3. Généraliser à travers l'adaptation d'un problème spécifique

Le raisonnement à partir de cas peut également conduire à une généralisation de connaissances. Selon Ross et Kennedy (1990), l'apprenant pourrait extraire des régularités au cours de l'adaptation d'une situation spécifique déjà connue pour résoudre un nouveau problème, et ainsi élaborer une connaissance abstraite. Pour étayer cette

hypothèse, ces chercheurs demandent à des sujets d'étudier des exemples représentant différents principes de probabilités puis de résoudre des problèmes similaires. La moitié des sujets résout des problèmes tests qui contiennent les mêmes protagonistes que l'exemple précédent, ce qui favorise l'évocation de la source (Ross 1987, 1989a). Ensuite, à l'aide d'un deuxième post-test les auteurs testent si les sujets ont élaboré une représentation abstraite des principes théoriques présents dans les exemples et les problèmes. Les sujets qui ont rencontré des problèmes ayant des protagonistes identiques lors du post-test, ont de meilleures performances lors du second post-test. Ceci montre qu'ils ont élaboré des connaissances plus détachées du contexte que des sujets qui ont rencontré des problèmes plus éloignés. D'après les auteurs, l'adaptation est facilitée par la similarité des problèmes et conduit à la construction d'un schéma.

Dans cette perspective, la généralisation serait le fruit non pas d'une comparaison entre les deux situations (la situation source et la situation cible) se déroulant après l'adaptation, mais véritablement de l'adaptation analogique elle-même (voir aussi Didierjean, 2003). Ainsi, Ross et Kennedy (1990, p. 52) décrivant ce type de phénomènes avancent « *Thus the learning occurs from making the analogy, not from some separate comparison process. It is quite possible that both types of comparisons lead to generalization. The argument is made here for the reminding view because it has received so little attention; the comparison between worked-out example is often thought to be important, but little evidence is adduced that it normally occurs.* » Contrairement aux autres processus de généralisation, supposés être mis en œuvre sur les situations sources, ce processus pourrait être mis en œuvre lors de l'adaptation de la situation source pour résoudre le nouveau problème.

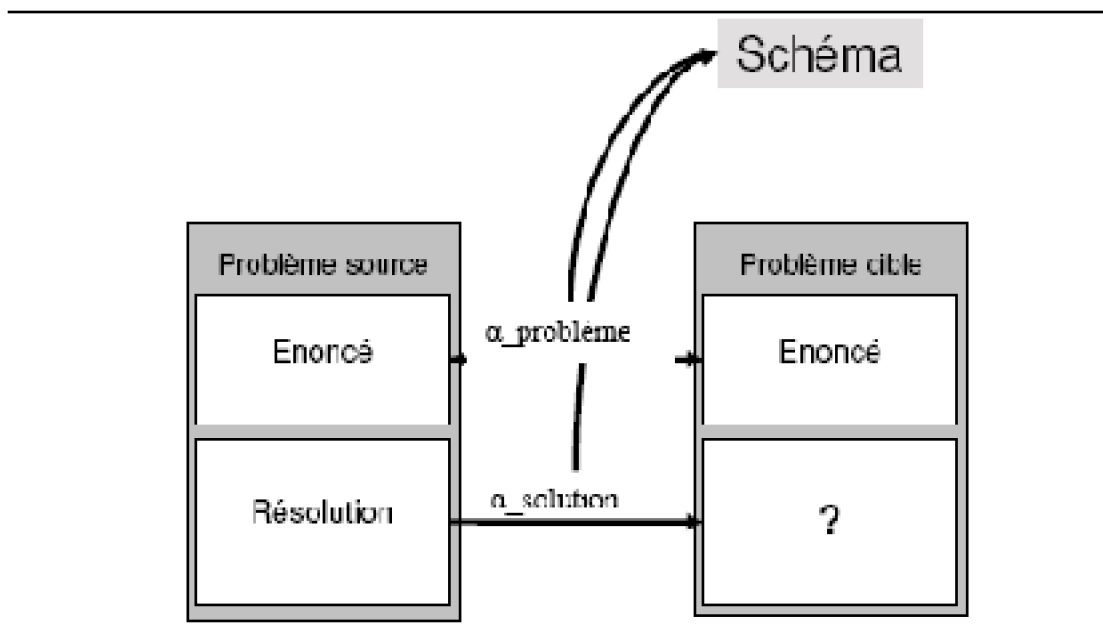


Figure 5 : Schématisation de la généralisation par adaptation

1.3. Bilan

L'analyse de problèmes résolus et la résolution de problèmes par analogie peuvent permettre à l'apprenant d'acquérir de nouvelles connaissances : il peut ainsi stocker des situations spécifiques et élaborer des connaissances plus générales, des schémas. Pour construire des schémas, l'apprenant dispose de plusieurs processus de généralisation (voir Cauzinille-Marmèche et Didierjean, 1999 ; Reeves et Weisberg, 1994, pour des revues de question). Il peut mettre en œuvre des processus explicatifs ou de détection de similitudes lors de l'analyse des problèmes sources. Il peut également élaborer une connaissance abstraite lorsqu'il adapte la solution du problème source pour résoudre un problème cible. Par ailleurs, des connaissances spécifiques (des exemples ou des parties d'exemples) peuvent être stockées en mémoire et réutilisées plus tard lors d'un raisonnement à partir de cas.

Toutefois, comme l'ont montré Gick et Holyoak (1983), la réutilisation d'un problème déjà rencontré pour en résoudre un nouveau n'est pas toujours spontanée et ne permet pas forcément d'élaborer de nouvelles connaissances. Par contre, certaines conditions telles que la présentation d'un second problème source, ou la présentation d'un problème cible ayant un habillage similaire au problème source (voir par exemple Holyoak et Koh, 1987) semblent faciliter la résolution de problèmes par analogie et l'acquisition de nouvelles connaissances. Il semble donc que certaines conditions soient plus favorables que d'autres à l'acquisition de connaissances et à leur réutilisation.

Deux questions se posent alors : qu'est-ce qui induit la mise en œuvre des processus de généralisation ? Quelles sont les conditions qui favorisent l'apprentissage ?

Le chapitre suivant examine les différentes conditions qui ont un effet sur l'apprentissage à partir d'exemples et montre que certains facteurs influent sur la mise en œuvre des différents processus de généralisation.

Chapitre 2 : Quelles conditions favorisent l'apprentissage à partir d'exemples ?

L'analyse et la résolution de problèmes par analogie peuvent être sources d'apprentissage. En effet, lorsqu'un sujet réalise ces activités, il peut d'une part stocker des situations spécifiques et d'autre part construire des connaissances plus générales (des schémas) à travers la mise en œuvre de différents processus de généralisation. Toutefois, cette acquisition de connaissances n'est pas systématique. Quelles sont les conditions les plus favorables à l'apprentissage ? Quels facteurs déclenchent les différents processus de généralisations ?

De nombreuses études se sont attachées à mettre en évidence des facteurs qui facilitent ou au contraire inhibent l'apprentissage lors de l'étude et de la résolution de problèmes. Ces différentes recherches ont identifié des facteurs « intra-problème », relatifs à la structuration ou à la présentation du problème, des facteurs « inter-problèmes » (relatifs au degré de similarité entre les exemples) et des facteurs liés à l'activité que réalise l'apprenant (voir Atkinson, Derry, Renkl et Worthman, 2000, pour

une revue).

Le plus représentatif des auteurs qui s'intéressent aux conditions qui favorisent l'apprentissage est sans nul doute Sweller. Cet auteur met en évidence un certain nombre d'effets et propose une théorie, la théorie de la charge cognitive (1988, 1994, 1999). Celle-ci interprète les conditions qui facilitent l'apprentissage en terme de « coût cognitif » des situations en mémoire de travail. Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter cette théorie, ses implications et les différentes données empiriques qui la soutiennent.

Cependant, il est à noter que dans les travaux de Sweller, la question des processus qui sont mis en œuvre par les sujets n'est pas véritablement abordée, Cette question semble pourtant importante.

Il nous semble en effet qu'un second niveau d'analyse, prenant davantage en compte les processus de généralisation, permet d'expliquer certaines conditions qui favorisent l'apprentissage à partir d'exemples. Suivant cet angle d'analyse, les conditions qui favorisent l'apprentissage sont celles qui conduisent l'apprenant à mettre en œuvre un processus de généralisation ou à mémoriser des connaissances spécifiques. Identifier les conditions favorables à un apprentissage à partir d'exemples revient alors à identifier les facteurs qui influencent la mise en œuvre des différents processus de généralisation ou la mémorisation de situations spécifiques.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous présenterons les différents résultats qui peuvent être interprétés comme facilitant la mise en œuvre de processus de généralisation.

2.1. Théorie de la charge cognitive

Sweller et ses collaborateurs ont mené de nombreuses études sur l'apprentissage en situation de résolution de problèmes afin d'identifier les conditions qui sont les plus favorables à l'apprentissage.

A partir de ces travaux, Sweller a développé une théorie, la « théorie de la charge cognitive » (« *Cognitive load theory* »). Cette théorie (Voir Sweller, 1988 ; 1994 ; 1999 ; Tricot, 1998 pour des revues de question, voir aussi le numéro spécial de la revue *learning and instruction*, 2002) s'appuie sur certaines propriétés de la mémoire humaine pour modéliser l'utilisation des ressources cognitives en situation d'apprentissage.

La mémoire humaine peut être décomposée en plusieurs sous-systèmes qui ont des propriétés différentes. L'information est d'abord traitée en mémoire de travail. Celle-ci a une capacité limitée (Miller, 1956 ; Baddeley, 1986), elle ne peut traité qu'un petit nombre d'éléments (ou chunk) simultanément pendant une durée limitée. La mémoire de travail est connectée à la mémoire à long terme, qui stocke un grand nombre de connaissances. En situation d'apprentissage, les apprenants traitent des informations en mémoire de travail et construisent ainsi des connaissances qu'ils stockent en mémoire à long terme. D'après Sweller, ces connaissances sont des schémas : des structures abstraites de connaissances composées d'éléments. Pour illustrer cette notion, Sweller (1994) donne l'exemple suivant :

Le problème « $a/b=c$, trouver a » nécessite d'utiliser plusieurs éléments. Ces éléments sont :

- Multiplier le côté gauche par b , ce qui donne ab/b 1.
- Comme le côté gauche a été multiplié par b , la même opération doit être réalisée du côté droit pour maintenir l'égalité, ce qui donne cb 2.
- La nouvelle équation est $ab/b = cb$ 3.
- Comme il y a b au numérateur et au dénominateur cela donne a . 4.
- La nouvelle équation est $a = cb$ 5.

Selon Sweller, un schéma est donc une structure abstraite de connaissances organisée en une suite de buts et de sous-buts qui encapsule de nombreux éléments d'informations formant ainsi un seul élément. Pour construire un tel schéma, l'apprenant doit disposer de suffisamment de ressources en mémoire de travail. Or, en situation d'apprentissage, l'apprenant doit partager ses ressources cognitives entre différentes sources de charges cognitives imposées par la tâche ou dédiées à la construction d'un schéma. La théorie de la charge cognitive décrit comment les ressources limitées de la mémoire de travail sont utilisées lorsque l'apprenant est en situation d'apprentissage. Sweller et al. (Sweller et Chandler, 1994 ; Sweller, van Merriënboer et Paas, 1998) distinguent trois sources de charges cognitives : (1) la charge cognitive extrinsèque pertinente, (2) la charge cognitive extrinsèque inutile et (3) la charge cognitive intrinsèque.

(1) Les efforts investis dans des traitements directement pertinents pour la construction de schémas sont appelés charge cognitive extrinsèque pertinente (*germane cognitive load*). Celle-ci correspond à la réalisation de traitements de haut niveau sur le matériel tels que l'analyse des informations importantes pour réaliser la tâche ou encore la construction de schémas. Cette forme de charge cognitive a fait l'objet de peu de travaux

(2) La charge cognitive extrinsèque inutile (*extraneous cognitive load*) est la charge cognitive relative à l'organisation du matériel, et aux activités réalisées par l'apprenant sur ce matériel non directement liées à la construction de schémas. Ainsi, ces ressources cognitives peuvent être utilisées pour intégrer différentes sources d'information (texte et schémas) ou encore pour effectuer des tâches parallèles (par exemple la prise de notes).

(3) La charge cognitive intrinsèque (*intrinsic cognitive load*) est la charge cognitive imposée par les caractéristiques de la tâche ou du matériel. Elle est déterminée par le nombre d'éléments en interaction qui doivent être traités simultanément. Selon la théorie de la charge cognitive, un élément correspond à ce qui est manipulé en mémoire de travail sous la forme d'une seule unité de traitement. Si le sujet dispose de connaissances préalables et de schémas appropriés, il lui est possible de regrouper plusieurs stimuli et de les traiter comme une seule unité (un chunk, Miller, 1956). Le nombre d'éléments qui doivent être traités simultanément dépend donc du niveau d'expertise des sujets, mais aussi de l'interaction entre ces éléments. Pour illustrer cette notion d'interaction entre éléments Sweller (1999, p. 3) présente l'exemple suivant : « Suppose five days after the day before yesterday is Friday. What day of the week is tomorrow ? ». Trouver la réponse,

« Wednesday », peut demander un peu de temps. En effet, dans cette phase les différents éléments interagissent et doivent être traités simultanément, ce qui impose une charge cognitive intrinsèque importante.

Il est à noter que la distinction entre la charge cognitive extrinsèque inutile et la charge cognitive intrinsèque soit plutôt de nature théorique. Néanmoins celle-ci facilite la compréhension de l'allocation des ressources en situation d'apprentissage.

Un apprentissage n'est effectif que si l'apprenant a suffisamment de ressources pour construire un schéma. Or, si la tâche devient particulièrement « coûteuse » pour la mémoire de travail en raison d'une charge cognitive intrinsèque ou d'une charge cognitive extrinsèque inutile trop importante, l'apprenant peut manquer des ressources cognitives nécessaires pour la construction d'un schéma. La réalisation de l'activité peut alors nuire à l'apprentissage.

Dans le cadre de cette théorie, de nombreux effets ont été mis en évidence et différentes propositions ont été faites pour faciliter l'acquisition de schémas.

2.2. Favoriser l'apprentissage en manipulant la charge cognitive

Selon la théorie de la charge cognitive, l'apprentissage peut être favorisé en limitant la charge cognitive imposée par le matériel et par la tâche afin de dégager des ressources pour la construction de schémas. Mais quelles sont les conditions qui provoquent une surcharge cognitive ? Comment réduire celle-ci ?

De nombreuses études ont cherché à identifier les facteurs qui permettent de réduire la charge extrinsèque inutile. Puis, plus récemment, certaines recherches ont tenté de manipuler la charge cognitive intrinsèque.

2.2.1. Diminuer la charge cognitive inutile (*extraneous cognitive load*)

Différentes études se sont attachées à identifier le mode de présentation du matériel et les activités à réaliser responsables d'une charge cognitive inutile. Dans cette section, nous décrivons ces différentes études ainsi que les différentes solutions proposées pour réduire ces sources de surcharge cognitive.

L'un des effets les plus simples mis en évidence par Sweller et al. (Sweller et Cooper, 1985 ; Cooper et Sweller, 1987 ; Ward et Sweller, 1990) concerne l'effet de l'analyse des exemples sur l'apprentissage. Ces auteurs ont montré que pour des sujets novices, la résolution de problèmes n'est pas l'activité la plus efficace pour améliorer les performances en résolution de problèmes (Cooper et Sweller, 1987 ; Sweller et Cooper, 1985). Dans ces études, les auteurs comparent des sujets qui résolvent des problèmes à des sujets qui étudient des problèmes résolus avant d'en résoudre d'autres. Ces études montrent que la résolution de problèmes est associée à des performances moins bonnes que l'étude des mêmes problèmes résolus. D'après la théorie de la charge cognitive, l'activité de résolution nécessiterait la mise en œuvre de différentes stratégies et la mobilisation de différentes connaissances pour trouver la résolution, ce qui pourrait entraîner une réduction des ressources disponibles pour la construction d'un schéma.

L'étude de Paas et Van Merriënboer (1994) soutient cette théorie. Les auteurs comparent des sujets qui analysent des problèmes à des sujets qui les résolvent et mesurent la charge cognitive perçue par les apprenants. Après chaque problème, les participants doivent indiquer l'effort mental perçu sur une échelle graduée de 1 à 9 (charge cognitive très très faible vs très très élevée). Un post-test permet ensuite de mesurer les progrès des apprenants. Comme attendu, l'analyse d'exemples conduit à plus de progrès que la résolution de problèmes. De plus, la charge cognitive perçue par les participants qui résolvent les problèmes est plus importante que la charge perçue lors de l'analyse d'exemples. L'analyse de problèmes résolus nécessiterait donc moins de ressources cognitives, ce qui libérerait des ressources pour la construction de schémas. Ainsi, pour des sujets ayant peu de connaissances préalables, résoudre des problèmes semble provoquer une charge cognitive importante (cf. Paas et Van Merriënboer, 1994) qui peut nuire à l'apprentissage.

Pour remédier à cette difficulté, Sweller propose de présenter à l'apprenant des problèmes résolus à analyser (Cooper et Sweller, 1987 ; Ward et Sweller, 1990 ; Paas et Van Merriënboer, 1994). Une autre alternative peut être de proposer des problèmes à compléter (Paas, 1992 ; Van Merriënboer et Krammer, 1987). Ceux-ci donnent l'état initial du problème, le but à atteindre et une solution partielle qui doit être complétée par l'apprenant (Renkl, Atkinson et Maier, 2000 ; Renkl, Atkinson, Maier et Staley, 2002 ; Renkl et Atkinson, 2003 ; Renkl, Atkinson, et Große , 2004). Ces problèmes à compléter facilitent la transition entre l'étude des exemples et la résolution complète de problèmes et sont source de progrès.

Sweller et al. se sont également beaucoup intéressés à un second facteur : la présentation de plusieurs sources d'information simultanément. Chandler et Sweller (1991) ont montré que la présentation d'un schéma accompagné de texte pouvait conduire à une surcharge cognitive et nuire à l'apprentissage. Dans cette étude, des sujets qui étudiaient un document dans lequel différentes sources d'informations (texte, schémas) étaient dispersées (document conventionnel) (Figure 6) étaient comparés avec des sujets qui étudiaient un document dans lequel les mêmes sources d'information étaient intégrées (document intégré) (Figure 6). Les résultats montrent que les sujets ayant étudié un document intégré ont des performances supérieures aux sujets ayant étudié un document « conventionnel », même deux mois après l'étude du document. Lorsque les sujets étudient des sources d'information séparées, ils doivent partager leurs ressources cognitives entre ces différentes sources, ce qui diminue les ressources disponibles pour l'apprentissage : C'est l'effet « d'attention partagée » (*Split attention effect*). Cependant, si les sources d'informations sont redondantes (Figure 6), c'est à dire si chacune d'elles est intelligible sans faire appel à l'autre, leur intégration n'améliore pas les performances des sujets (*Redundancy effect*) (Chandler et Sweller, 1991 ; voir Sweller, 1999, pour une revue de question ; Mayer, 2001 dans le domaine du multimédia). En revanche, la suppression de l'une d'elles diminue le temps consacré à l'étude du document et favorise l'apprentissage. Les auteurs parlent d'un effet de « redondance ».

Diagramme : la circulation du sang à travers le cœur, les poumons et le corps

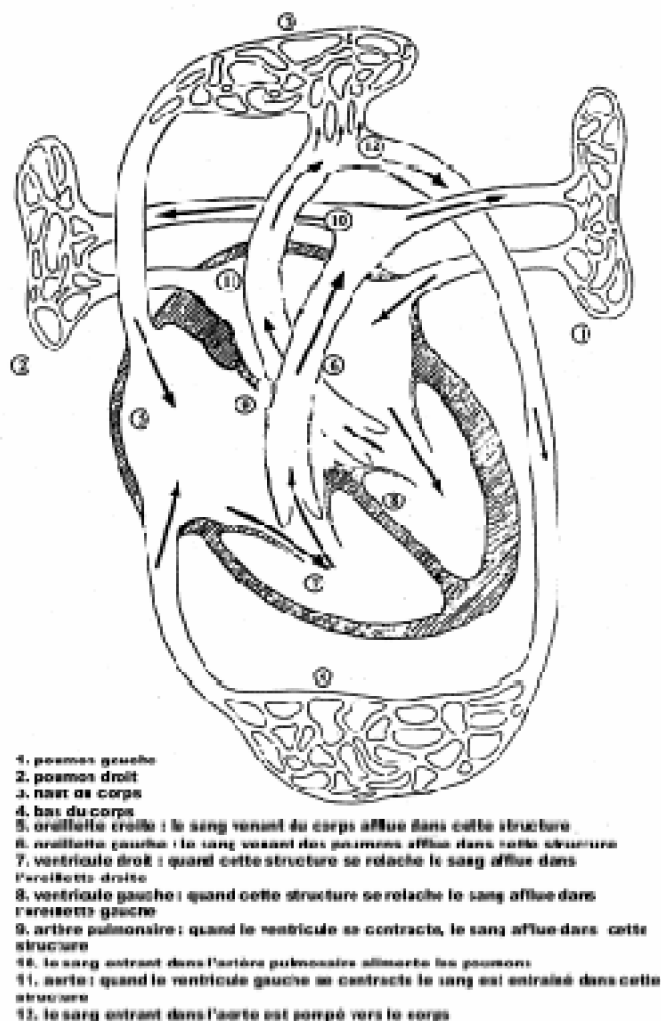
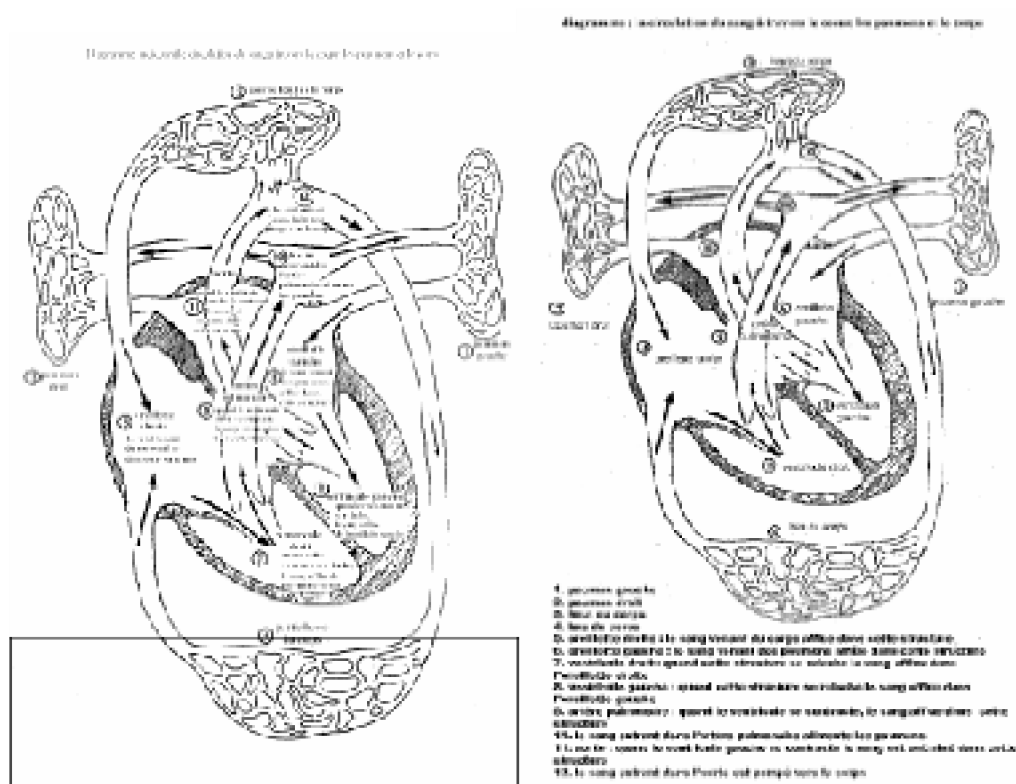


Figure 6 : Documents présentés dans les formats « conventionnel » « intégré » et « redondant » qui décrivent la circulation du sang dans le cœur (Chandler et Sweller, 1991)



Ces différentes études montrent donc que les formats conventionnels de présentation du matériel pédagogique provoquent souvent une surcharge cognitive. Cependant, il est possible de diminuer cette charge cognitive inutile en proposant des exemples à analyser ou des problèmes à compléter (Tarmizi et Sweller, 1988 ; Ward et Sweller, 1990) et en modifiant le format de présentation : les différentes sources d'informations peuvent être intégrées (cf. Figure 7 pour un exemple) afin de réduire l'effet d'attention partagée ou l'une d'elle peut être supprimée afin d'éliminer les redondances (Chandler et Sweller, 1991 ; 1992 ; 1996 ; Mayer et Anderson 1991 Mayer et Moreno, 2003 ; Sweller, Chandler, Tierney, et Cooper, 1990).

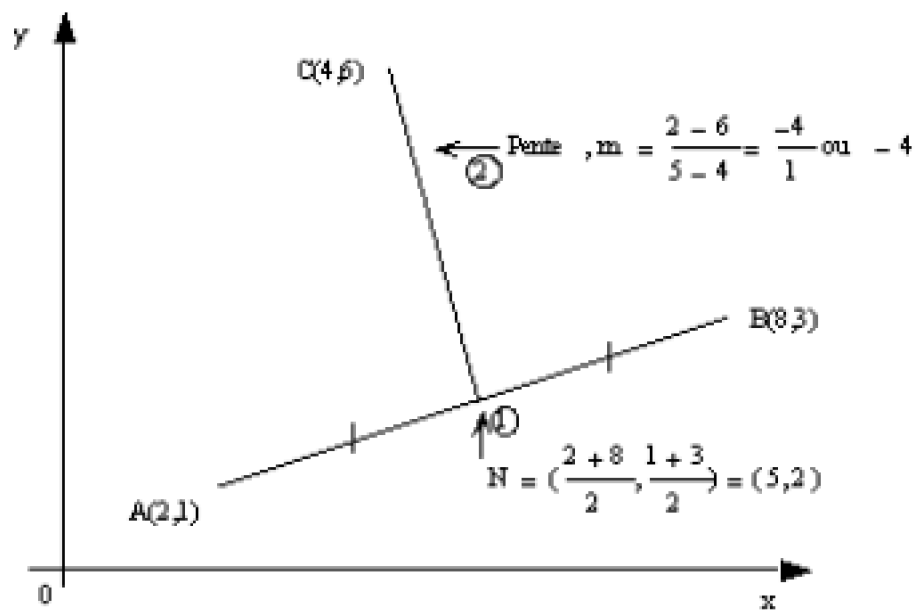


Figure 7 : Présentation « intégrée » de la solution d'un problème de géométrie portant sur le calcul d'un point médian et de la pente d'une droite : les équations sont intégrées à la figure (Sweller, Chandler, Tierney, et Cooper, 1990)

2.2.2. Manipuler la charge cognitive intrinsèque

On a longtemps pensé que seule la charge cognitive extrinsèque inutile pouvait être diminuée, la charge cognitive intrinsèque étant considérée comme invariable puisqu'elle dépend directement du nombre d'éléments en interaction. Pourtant, quelques études (Pollock, Chandler et Sweller, 2002 ; Van Merriënboer, Krischner et Kester ; 2003 ; Gerjets, Scheiter et Catrambone, 2004) proposent des solutions pour diminuer la charge cognitive intrinsèque.

SÉQUENCER L'INFORMATION

Une première approche consiste à diviser la tâche complexe à réaliser en sous-tâches moins complexes réalisables séparément. La charge cognitive associée à chaque sous-tâche est alors moins importante que la charge cognitive allouée à la tâche totale et permet d'acquérir des connaissances pour réaliser la tâche complexe. La charge cognitive intrinsèque est donc réduite.

Pollock, Chandler et Sweller (2002) testent cette approche en demandant à deux groupes de réaliser une tâche complexe consistant à tester la sécurité d'un circuit électrique. Le premier groupe doit étudier directement les éléments du circuit en interaction tandis que l'autre groupe étudie d'abord séparément les éléments permettant de réaliser la tâche complexe (les différents composants du circuit électrique) avant d'apprendre à tester la sécurité du circuit. Après cette phase d'apprentissage, l'effort mental perçu est mesuré sur une échelle. Les résultats montrent qu'étudier des éléments isolément avant d'étudier la tâche complexe augmente significativement les performances

et diminue la charge cognitive perçue chez des novices (ce mode de décomposition de la tâche n'a pas d'effet sur des apprenants ayant déjà des connaissances préalables).

Cette méthode semble donc avantageuse au moins chez des apprenants novices. Dans le même sens, Van Merriënboer, Krischner et Kester (2003) proposent de réduire la charge cognitive intrinsèque en réalisant d'abord une tâche simplifiée puis en augmentant progressivement la difficulté de la tâche jusqu'à aboutir à la tâche complexe. Il est cependant à noter que ces deux méthodes diminuent la charge cognitive intrinsèque imposée en modifiant la nature de la tâche.

PRÉSENTER LA RÉOLUTION DES PROBLÈMES SOUS UNE FORME MODULAIRE

Gerjets, Scheiter et Catrambone (2004) proposent de réduire la charge cognitive intrinsèque non pas en dénaturant la tâche, mais en en présentant les exemples autrement : de façon modulaire plutôt que « molaire » (Figure 8).

Les exemples « molaires », traditionnellement utilisés, proposent d'abord une formule générale qui condense plusieurs étapes et qui représente la solution, puis implémentent cette formule pour le problème présenté. Ces exemples « molaires » (Figure 8) doivent aider l'apprenant à s'approprier cette formule et à connaître dans quelles situations la réutiliser. Ce format de présentation des exemples impose une forte charge cognitive intrinsèque (Gerjets, Scheiter et Catrambone, 2004). Pour pallier ce problème Gerjets, Scheiter et Catrambone (2004) proposent de présenter des exemples modulaires (Figure 8) dans lesquels les différentes étapes de la résolution sont décrites séquentiellement. De cette façon, chaque étape peut être comprise séparément des autres. Une étude a été menée avec des problèmes de calcul de probabilités complexes (Gerjets, Scheiter et Kleinbeck, sous presse cité dans Gerjets et al., 2004). Dans ce domaine, calculer une probabilité d'un événement complexe consiste soit à appliquer une formule générique (exemples molaires) au problème posé, soit à décomposer le calcul de la probabilité complexe en plusieurs calculs simples de chaque événement individuel, puis à multiplier les probabilités des événements individuels (exemples modulaires).

Figure 8 : Problèmes résolus molaires et modulaires (traduction des problèmes proposés par Gerjets, Scheiter et Catrambone, 2004)

Aux jeux Olympiques, 7 coureurs participent à la course de 100 mètres. Quelle est la probabilité d'estimer correctement le vainqueur des médailles d'or, d'argent et de bronze ?	
Exemple molaire Identifier les caractéristiques de la tâche Ce problème est un arrangement (liste sans remise). Ce type de problème a deux caractéristiques importantes : l'ordre de sélection et la non remise des éléments sélectionnés. Nous ne sommes pas seulement intéressés par la manière dont 3 coureurs parmi 7 peuvent gagner une médaille, nous voulons connaître spécifiquement quel joueur gagne quelle médaille. C'est pourquoi l'ordre de sélection compte. Un coureur peut gagner au maximum une médaille. Ainsi, ce problème est sans remise, une fois qu'un coureur a gagné une médaille, il ne peut pas être à nouveau sélectionné. Appliquer la formule Pour ce type de problème la formule suivante doit être appliquée : $A = n! / (n-k)!$ avec n, le nombre de coureurs et k le nombre de coureurs qui ont été correctement choisis. Insérer les valeurs Dans l'exemple proposé il y a 7 coureurs qui peuvent être choisis. C'est donc l'ensemble des éléments qui peuvent être sélectionnés ($n=7$). Comme nous voulons connaître la probabilité de choisir correctement les gagnants de la médaille d'or, d'argent et de bronze, 3 coureurs parmi 7 sont sélectionnés. Le nombre de coureurs sélectionnés est donc égal à 3. Insérons ces valeurs dans la formule correspondant à une répartition de type liste sans remise : $7! / (7-3)! = 210$ arrangements possibles. Calculer la probabilité Pour calculer la probabilité d'identifier correctement les vainqueurs des trois médailles, on divise 1 (l'arrangement particulier qui nous intéresse) par le nombre d'arrangements possibles. Ainsi, la probabilité d'identifier cet arrangement (le gagnant de chacune des 3 médailles) est de $1/210$.	Exemple modulaire Trouver la probabilité du premier événement Pour trouver la probabilité du premier événement, vous devez considérer le nombre de choix acceptables et l'ensemble des choix possibles. Le nombre de choix acceptable est 1 puisque un seul coureur peut gagner la médaille d'or. L'ensemble des choix possibles est 7 puisque 7 coureurs participent. La probabilité d'identifier le coureur gagnant de la médaille d'or est donc de $1/7$. Trouver la probabilité du second événement Pour trouver la probabilité du second événement, vous devez considérer le nombre de choix acceptables et l'ensemble des choix possibles. Le nombre de choix acceptables est toujours 1 puisqu'un seul coureur peut gagner la médaille d'argent. L'ensemble des choix possibles est 6 puisque seuls 6 coureurs participants à la course sont encore éligibles pour gagner la médaille d'argent. La probabilité d'identifier le coureur gagnant de la médaille d'or est donc de $1/6$. Trouver la probabilité du troisième événement Pour trouver la probabilité du troisième événement, vous devez considérer le nombre de choix acceptables et l'ensemble des choix possibles. Le nombre de choix acceptables est toujours 1 puisque un seul coureur peut gagner la médaille de bronze. L'ensemble des choix possibles est 5 puisque seuls 5 coureurs participants à la courses sont encore éligibles pour gagner la médaille de bronze. La probabilité d'identifier le coureur gagnant de la médaille d'or est donc de $1/5$. Calculer la probabilité totale La probabilité totale est calculée en multipliant la probabilité de tous les événements singuliers. Ainsi, la probabilité d'identifier correctement les 3 gagnants des 3 médailles est : $1/7 * 1/6 * 1/5 = 1/210$

Dans cette expérience, durant une phase d'apprentissage, un groupe étudie des exemples molaires tandis que l'autre groupe étudie des exemples modulaires. Les

apprenants doivent ensuite résoudre différents problèmes transfert. Les résultats de cette étude montrent que l'analyse d'exemples modulaires est plus rapide, conduit à de meilleures performances en transfert, et impose une charge cognitive moins importante que l'analyse d'exemples molaires, ceci quelles que soient les connaissances préalables des sujets. La présentation modulaire semble donc permettre de réduire la charge cognitive intrinsèque. Cependant, cet effet semble très lié au domaine des probabilités ; il serait probablement intéressant de le répliquer dans d'autres domaines.

Ainsi, la charge cognitive intrinsèque à la tâche peut être manipulée soit en modifiant la tâche elle-même, en la découpant en séquences ou en la simplifiant, soit en présentant des exemples sous un format modulaire.

Les différentes études présentées ici identifient différentes sources de surcharge cognitive et montrent qu'il est possible de proposer des modes de présentation et des activités qui réduisent celle-ci et conduisent à une augmentation des performances. Mais est-il suffisant de réduire la charge cognitive pour favoriser l'apprentissage ? L'apprenant utilise-t-il automatiquement les ressources dont il dispose pour construire un schéma ? Et quels sont les processus que la charge cognitive disponible permet alors de mettre en œuvre ?

Comme le souligne Bannert (2002), la réduction des charges cognitives inutile et intrinsèque ne garantit pas que les ressources cognitives libérées soient bien allouées à l'acquisition de schéma plutôt qu'à des processus non pertinents pour l'apprentissage (Bannert, 2002). Il nous semble donc qu'un second niveau d'analyse, distinct des ressources en mémoire de travail, peut être distingué. Celui-ci est relatif aux conditions qui conduisent le sujet à utiliser ou non ses ressources cognitives pour construire des schémas.

2.3. Favoriser la mise en œuvre de processus de généralisation

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, pour construire des schémas, les sujets disposent de plusieurs processus de généralisation.

De notre point de vue, lorsque les sujets disposent des ressources cognitives suffisantes, certaines conditions peuvent l'inciter à mettre en œuvre ces processus de généralisation pour construire des connaissances abstraites. Quelles sont alors les conditions qui favorisent la mise en œuvre de ces processus de généralisation ?

Dans cette section, nous passons en revue différents facteurs qui semblent faciliter la mise en œuvre de l'un des processus de généralisation. Nous décrivons d'abord les études qui portent sur l'élaboration d'auto-explications ; puis nous présenterons différents modes de présentation des problèmes qui semblent faciliter la mise en œuvre de processus, et, finalement, nous traiterons de l'effet des similarités entre problèmes présentés successivement sur l'apprentissage.

2.3.1. Favoriser les activités d'auto-explication sur les exemples

Pour tenter de comprendre la nature des activités mises en œuvre par les apprenants

face à des problèmes résolus, un certain nombre de recherches expérimentales ont consisté à demander aux sujets de verbaliser durant l'étude d'exemples. Ces travaux ont ainsi mis en évidence certaines verbalisations et activités associées à une bonne compréhension des exemples.

Dans une étude princeps, Chi, Bassok, Lewis, Reimann et Glaser (1989) distinguent les verbalisations associées à de bonnes performances en résolution de problèmes de celles qui sont plutôt associées à de mauvaises performances. Dans cette recherche, les sujets doivent étudier des principes théoriques du domaine de la physique puis trois exemples en les commentant à voix haute. Ensuite ils doivent résoudre trois problèmes isomorphes. A partir des performances obtenues pour les problèmes du post-test, les auteurs distinguent deux groupes de sujets : un groupe qui réussit bien les problèmes du post-test et un groupe qui échoue. Chi et al. (1989) étudient alors ce qui a distingué ces deux groupes dans la phase d'analyse des exemples qui précédait le post-test. Leurs résultats montrent que leurs verbalisations se distinguent, non pas par leur nombre, mais par leur contenu. Les bons apprenants tentent plus souvent d'établir des liens entre les différentes étapes de résolution, et s'interrogent sur les conditions d'application et les buts des opérateurs qu'ils utilisent. Ces verbalisations qualifiées d'« auto-explications » sont définies par les auteurs comme des propos qui appartiennent au domaine étudié, des actes exploratoires susceptibles de conduire à la solution, par opposition aux propos dans lesquels les sujets commentent simplement leur niveau de compréhension.

Cette première recherche a ouvert la voie à tout un domaine de recherche sur les auto-explications et leur rôle (Chi De Leeuw, Chiu et La Vancher, 1994 ; Pirolli et Recker, 1994 ; Renkl, 1997 ; Van Lehn, 1998).

QUALITÉ DES AUTO-EXPLICATIONS

Comme souligné précédemment, plus que le nombre de verbalisations produites, c'est surtout leur qualité qui est importante (Chi et al., 1989 ; Renkl, 1997 ; Neuman et Schwarz, 1998). Dans une recherche qui réplique les résultats de Chi et al. (1989) sur un plus grand nombre de sujets, Renkl (1997) montre que l'on peut distinguer différentes catégories d'auto-explications et qu'il existe des différences interindividuelles dans le recours à ces différentes catégories.

L'auteur distingue ainsi plusieurs « styles » d'auto-explications qui correspondent à des niveaux de performances différents :

- **Le style dit « anticipatif »** est caractérisé par une tentative chez les sujets d'anticiper les étapes à venir lors de la lecture des exemples. Cette catégorie de verbalisation est associée ensuite à de bonnes performances sur de nouveaux problèmes.
- **Le style dit « basé sur les principes »** est défini par le fait de donner du sens aux opérateurs en explicitant les principes sous-jacents aux étapes, et en les faisant correspondre aux sous-buts. Cette catégorie de verbalisation est également associée à de bonnes performances.
- Enfin les auteurs distinguent deux autres catégories de verbalisations qui conduisent à un faible apprentissage. **Le style dit « passif »** qui consiste essentiellement à

exprimer la non compréhension, et le **style dit « superficiel »**, qui, associé à un temps d'étude faible des exemples, consiste à tenter de dégager les principes sous-jacents, mais de manière peu poussée.

Renkl (1997) montre qu'il existe des différences individuelles importantes dans l'utilisation des différentes catégories de verbalisations. Les sujets adoptent majoritairement l'une des catégories et ce « choix » a des conséquences sur l'apprentissage (voir aussi Didierjean et Cauzinille-Marmèche, 1998).

Il existe des similarités entre les différents styles d'auto-explications conduisant à de bonnes performances et les travaux sur les processus d'apprentissage. Le style dit « basé sur les principes » fait référence à des activités (mise en évidence des principes sous-jacents à l'exemple, lien entre les opérations réalisées et les sous-buts à atteindre) très proches des activités décrites dans le cadre des travaux sur les processus explicatifs. Dans ces travaux, on observe que les apprenants tentent de poser des liens causaux entre les étapes, pour construire une connaissance organisant l'enchaînement de ces liens en succession de sous-buts (Ahn, Brewer et Mooney, 1992 ; Brown et Kane, 1988 ; Elio et Anderson, 1983 ; Kieras et Bovair, 1986). On peut faire l'hypothèse que les auto-explications, et tout particulièrement celles basées sur les principes correspondent à la mise en œuvre de processus explicatifs. Wong et al. (2002) appuient cette hypothèse en analysant à l'aide d'un calcul de régression les causes de l'apprentissage après un entraînement aux auto-explications « basées sur les principes ». Le résultat de ces analyses montre que l'entraînement aux auto-explications est une cause indirecte des performances. Les performances sont causées par la génération de connaissances nouvelles à travers la mise en relation des connaissances préalables et des exemples. Il semble donc que les effets de l'entraînement aux auto-explications puissent être liés à la mise en œuvre de processus explicatifs.

Quant au « style anticipatif », qui se caractérise par une anticipation des étapes à venir lors de la lecture des exemples, plusieurs hypothèses semblent pouvoir expliquer la nature des processus reflétés par cette activité. Tout d'abord, cette tentative d'anticipation pourrait correspondre à une activité de comparaison des situations : c'est sur la base d'une remémoration des exemples passés que le sujet « anticipe » l'étape à venir. De plus, cette activité (telle qu'elle est décrite par Renkl) est très proche de la notion d'attente déçue décrite dans les travaux sur le raisonnement à partir de cas (Kolodner, 1993 ; 1997 ; Schank, 1982 ; 1999). Les activités d'anticipation pourraient permettre à l'apprenant d'identifier avec précision les passages des exemples qui sont sources de difficultés, que ce soit pour tenter d'extraire la structure de ces passages via des processus explicatifs, ou pour mémoriser ces passages et leurs solutions pour la mise en œuvre ultérieure d'un raisonnement à partir de cas.

Dès lors que des activités semblent davantage que d'autres associées à la mise en œuvre de processus de généralisation conduisant à un apprentissage efficace des principes en jeu, une question importante est de savoir s'il est possible d'induire chez les apprenants le recours à ces activités.

INDUCTION D'AUTO-EXPLICATIONS

Plusieurs méthodes de natures différentes ont été développées dans le but d'induire l'activité d'auto-explication (Alaven et Koedinger, 2002 ; Bielaczyc, Pirolli et Brown, 1995 ; Conati et Vanlhen, 1999 ; 2000 ; Chi et al., 1994 ; Neuman et Schwarz, 1998 ; Wong et al., 2002).

Bielaczyc, Pirolli et Brown (1995) entraînent des sujets, dans le cadre d'un cours de programmation, à l'utilisation des stratégies d'auto-explications mises en évidence par Chi et al (1989) (ce qui correspond au style basé sur les principes). Dans cette expérience, les auteurs comparent les performances de deux groupes de sujets qui reçoivent (groupe expérimental), ou non (groupe contrôle) un entraînement explicite aux stratégies d'auto-explications. Après trois cours d'introduction communs aux deux groupes, l'instructeur présente au groupe expérimental le principe et l'intérêt des procédures d'auto-explications, puis les applique sur des exemples concrets pendant deux séances. Ces sujets les appliquent ensuite eux-mêmes sur des exemples. Pour le groupe contrôle l'instructeur fait une intervention de même longueur en utilisant un matériel identique (manuel d'instruction, exemples, vidéo) mais sans faire référence aux stratégies d'auto-explications. Une dernière séance commune aux deux groupes permet d'évaluer leurs performances en programmation. Les résultats de cette recherche montrent que le groupe expérimental a davantage progressé que le groupe contrôle.

Si dans la recherche de Bielaczyc et al. (1995) les sujets ont un entraînement aux auto-explications qui demande beaucoup de temps (deux séances d'entraînement aux auto-explications), les mêmes résultats semblent pouvoir être obtenus plus rapidement (Stark, Mandl, Gruber et Renkl, 2002 ; Wong et al., 2002). Dans une recherche, Stark et al. (2002) proposent à un groupe d'apprenants un entraînement dans lequel l'expérimentateur sert de modèle pendant vingt minutes en s'auto-expliquant à haute voix un problème résolu, puis donne un feedback lorsque les apprenants produisent eux-mêmes des auto-explications. Un autre groupe d'apprenants (groupe contrôle) est exposé aux mêmes exemples sans instruction supplémentaire. Cet entraînement de vingt minutes aux auto-explications donne des effets sur l'apprentissage très positifs, les performances obtenues par ce groupe étant supérieures aux performances du groupe contrôle. Ces premières recherches sur les auto-explications ont tenté d'induire des auto-explications du style dit « basé sur les principes ». Comme l'a montré Renkl (1997), le style « anticipatif » conduit également à de bonnes performances. Stark (1999 ; décrit par Renkl, 2002) tente d'induire un raisonnement « anticipatif » en insérant des « blancs » dans des problèmes résolus. Les exemples sont présentés étape par étape, avec des éléments manquants dans le matériel étudié par le groupe expérimental. Après avoir complété les trous, le groupe expérimental reçoit un feedback sur la justesse des anticipations produites. Les résultats obtenus aux problèmes tests présentés ensuite montrent que le groupe expérimental obtient de meilleures performances que le groupe contrôle. La présentation séquentielle de problèmes à compléter limite la charge cognitive imposée aux sujets (cf. § 221) et supporte la mise en œuvre d'un raisonnement anticipatif.

Ainsi, ces différentes études indiquent d'abord que les auto-explications peuvent être produites par les apprenants qui étudient des exemples, mais qu'il existe des différences interindividuelles importantes. Seules certaines auto-explications sont associées à des gains en performances. Ces effets ont été montrés pour différents types de matériels

(exemples résolus, problèmes à résoudre (Neuman et Schwarz, 1998), instructions textuelles (Bielaczyc et al., 1995)) et dans différents domaines (apprentissage de la programmation, résolution de problèmes, etc.). De plus, il est possible d'induire la production des styles d'auto-explications associés à de bonnes performances à travers un entraînement, mais aussi par une modification du format de présentation des exemples.

Par ailleurs, de notre point de vue, des liens peuvent être faits entre les styles d'auto-explications sources de progrès et certains processus d'apprentissage. On peut supposer que le style dit « basé sur les principes » correspond à la mise en œuvre de processus explicatifs, les mêmes activités étant décrites dans les travaux sur ce style d'auto-explications et sur les processus explicatifs. Par ailleurs, on peut supposer que le style dit « anticipatif » correspond à la mise en œuvre de détection de similitudes ou au stockage d'informations spécifiques sur la base d'attentes déçues. Reprendre les études sur les auto-explications avec un regard davantage tourné vers l'analyse des processus pourrait permettre de mieux comprendre comment les mécanismes d'apprentissage sont mis en œuvre.

2.3.2. Modifier le format de présentation des problèmes

S'il est clair que les activités mises en œuvre face à un problème jouent un rôle déterminant dans la généralisation de connaissances, un deuxième aspect important concerne le mode de présentation de ces problèmes. En effet, il semble que celui-ci ait une influence non seulement sur la charge cognitive inutile et la charge cognitive intrinsèque, mais aussi sur le déclenchement ou non déclenchement des processus d'apprentissage. Certaines études ont ainsi montré que différentes modifications du matériel, telles que l'ajout d'un diagramme ou la mise en évidence de certaines parties d'un problème peuvent influencer sur les processus mis en œuvre. Les similarités entre les différents problèmes proposés semblent également pouvoir orienter la mise en œuvre de l'un ou l'autre des processus de généralisation. Nous présentons ici une synthèse des études portant sur l'effet du mode de présentation des exemples sur les processus. Nous aborderons d'abord le rôle des diagrammes sur le déclenchement des processus, puis le rôle de la saillance des éléments structuraux que contiennent les exemples avant de présenter les recherches qui portent sur l'influence de la similitude/dissimilitude entre les exemples présentés.

PRÉSENTATION DE DIAGRAMMES ET PROCESSUS D'APPRENTISSAGE

Quel peut être l'effet de la présentation d'un diagramme sur les processus d'apprentissage mis en jeu par l'apprenant ?

Ainsworth et Loizou (2003) ont abordé cette question en comparant deux groupes de sujets. L'un étudie un texte présentant un concept à apprendre tandis que l'autre étudie le même texte mais accompagné d'un diagramme. Pendant l'étude du matériel, il est demandé aux participants de s'expliquer à eux-mêmes les exemples. Si les résultats de cette étude montrent tout d'abord de meilleures performances lors du post-test lorsqu'un diagramme a été adjoint au texte, ils montrent également que les sujets produisent davantage d'auto-explications et plus précisément des auto-explications centrées sur les

buts à atteindre (correspondant aux auto-explications « basées sur les principes » d'après la classification de Renkl, 1997). Ainsi, si l'ajout d'un diagramme à du texte ne provoque pas de surcharge cognitive, il semble qu'il puisse favoriser la mise en œuvre de processus explicatifs permettant ainsi de construire des connaissances abstraites.

Il est à noter que la tâche proposée dans cette expérience était une étude de texte. Il serait probablement intéressant de réaliser une étude comparable en situation de résolution de problèmes.

INFLUENCE DE LA SAILLANCE DES ÉLÉMENTS STRUCTURAUX DES EXEMPLES

Si l'ajout de graphiques au texte ou aux problèmes semble jouer un rôle dans la mise en œuvre de processus d'apprentissage, la mise en évidence des éléments structuraux semble également jouer un rôle important. Ainsi, le même exemple peut donner lieu à des apprentissages très différents selon que l'on rende plus ou moins saillants les éléments structuraux qu'il contient. Dans une série de recherches, Catrambone (1994 ; 1995 ; 1996) compare deux groupes de sujets qui étudient des exemples (Figure 9). Pour l'un des groupes, un élément structural de l'exemple est mis en évidence par une étiquette (« *label* ») qui nomme explicitement ce qui est calculé, tandis que l'autre groupe étudie les mêmes exemples sans « étiquette ». (Figure 9). Les résultats obtenus montrent que simplement en étiquetant un élément important de la résolution, on peut améliorer considérablement l'apprentissage.

Un juge note que quelques-uns des 219 avocats du palais de justice possèdent plus d'un attaché-case. Il compte le nombre d'attaché-case de chaque avocat et observe que 180 avocats ont un seul attaché-case, 17 en ont 2, 13 en ont 3 et 9 en ont 4. En utilisant la distribution de Poisson, déterminez la probabilité qu'un avocat choisi au hasard possède exactement 2 attachés-cases.	
Solution classique	Solution avec un label
$E(X) = \frac{180 + 2 \times 17 + 3 \times 13 + 4 \times 9}{219}$ $= \frac{289}{219} = 1.32 = \lambda$ λ = nombre moyen d'attaché-case $P(X=x) = \frac{\left[\left(e^{-\lambda} \right) (\lambda^x) \right]}{x!}$ $P(X=2) = \frac{2.718^{-1.32} \times 1.32^2}{2!}$ $= \frac{0.27 \times 1.74}{2} = 0.235$	$E(X) = \frac{180 + 2 \times 17 + 3 \times 13 + 4 \times 9}{219}$ $= \frac{\text{nombre total d'attaché-case}}{219}$ $= \frac{289}{219} = 1.32 = \lambda$ λ = nombre moyen d'attaché-case $P(X=x) = \frac{\left[\left(e^{-\lambda} \right) (\lambda^x) \right]}{x!}$ $P(X=2) = \frac{2.718^{-1.32} \times 1.32^2}{2!}$ $= \frac{0.27 \times 1.74}{2} = 0.235$

Figure 9 : Exemple de problème proposé par Catrambone, (1995, 1996) avec ou sans label

L'étude des verbalisations des participants sur les exemples (Catrambone, 1996) montre que la mise en évidence d'un élément structural (un sous-but) par une étiquette amène l'apprenant à s'interroger sur ce sous-but et favorise l'apprentissage. Cet auteur montre aussi que la structuration des exemples en sous-buts importe plus que le contenu du « label » associé au sous-but. Ainsi, si l'on introduit dans l'exemple un label non informatif, les sujets progressent davantage que si l'on n'introduit pas de label (Catrambone, 1996).

Catrambone (1995, 1996) montre ainsi que la présence d'une étiquette joue un rôle important : les apprenants s'interrogent sur les raisons du positionnement de cette étiquette et ce faisant, ils identifient les éléments structuraux de l'exemple pertinents pour la résolution. La présence d'une étiquette semble donc favoriser la généralisation via la mise en œuvre de processus explicatifs.

2.3.3. Influence des similitudes entre problèmes présentés successivement

Comme nous l'avons présenté plus haut, certains facteurs liés au mode de présentation d'un problème jouent un rôle important dans la généralisation de connaissances.

Néanmoins, la plupart des apprentissages s'effectuent à travers l'analyse non pas d'une unique situation mais de multiples problèmes. Les apprenants sont souvent amenés à étudier plusieurs exemples et à résoudre de nombreux problèmes. Dans ces conditions, les similarités des exemples et problèmes présentés successivement ont-elles une influence sur le déclenchement des processus d'apprentissage ?

De nombreuses études montrent que la similarité/dissimilarité entre les différents problèmes présentés joue un rôle dans l'apprentissage en favorisant l'un ou l'autre des processus d'apprentissage. Cette section présente d'abord les études qui portent sur les similarités entre problèmes résolus avant d'aborder la question de la similarité entre exemples étudiés et problèmes à résoudre.

RÔLE DE LA SIMILARITÉ/DISSIMILARITÉ DES PROBLÈMES ÉTUDIÉS

Lorsque l'on souhaite faire acquérir des concepts théoriques, on peut manipuler la similarité/dissimilarité de l'habillage des problèmes résolus. Par exemple, pour illustrer le concept d'accélération en physique, on peut ne présenter que des exemples qui mettent en jeu un mobile qui se déplace sur un plan incliné, ou des exemples ayant la même structure mais qui mettent en jeu le déplacement d'un train pour l'un, d'un skieur pour l'autre, etc. Il est également possible de manipuler la similarité/dissimilarité de la structure des exemples. Dans un premier temps nous présenterons les résultats portant sur les similarités de surface. Dans un deuxième temps nous aborderons la question du rôle des similarités de structure sur le déclenchement des processus de généralisation.

Similarité/dissimilarité des traits de surface

Lorsque plusieurs exemples isomorphes en terme de structure sont présentés, un certain nombre de résultats montrent que plus l'habillage des exemples est contrasté, plus les performances observées ensuite sur de nouveaux problèmes sont élevées. Gick et Holyoak (1983) montrent ainsi que lorsque deux problèmes isomorphes et leurs solutions sont présentés à des sujets, ils réussissent ensuite mieux à résoudre un nouveau problème si les habillages des problèmes étudiés se ressemblent peu. Un résultat similaire a été obtenu par Quillici et Mayer (1996). Ceux-ci donnent à étudier à des sujets neuf exemples de problèmes de statistiques répartis en trois blocs de problèmes, correspondant à trois tests statistiques différents et font varier l'hétérogénéité des traits de surface à l'intérieur d'un bloc. Selon les sujets et les blocs, les trois problèmes consécutifs dans un bloc illustrent un même test et utilisent des traits de surface similaires ou, au contraire, illustrent un même test mais utilisent des exemples ayant des traits de surface dissimilaires. Après avoir étudié le matériel, les participants doivent réaliser une tâche de catégorisation de problèmes et résoudre des problèmes transfert. Les résultats montrent que lorsque les traits de surface sont hétérogènes, les sujets catégorisent plus facilement sur la base des traits de structure et ont des performances supérieures pour les

problèmes transfert. Pourquoi la diversification des traits de surface conduit-elle à davantage de généralisation ? Dans leur recherche, Gick et Holyoak (1983) suggèrent que l'aspect positif de l'hétérogénéité des traits de surface tient à la mise en œuvre de processus de détection de similitudes (voir aussi, Bassok, 1990 ; Bassok et Holyoak, 1989 ; Cummins, 1992). Les sujets compareraient les situations pour construire une connaissance sur leur structure commune. Cette tâche est d'autant plus facile que les situations ne partagent que cette structure, et ont peu de traits de surface communs.

Similarité/dissimilarité des traits de structure

Si la dissimilarité des exemples isomorphes est source de progrès, il peut également être profitable de présenter ensemble des problèmes corrigés non isomorphes (Chen et Mo, 2004 ; Gick et Paterson, 1992 ; Pass et Van Merriënboer, 1994). Gick et Paterson (1992) montrent que la présentation de deux exemples isomorphes et d'un troisième exemple qui diffère par un seul trait de structure favorise davantage l'apprentissage des principes en jeu que la présentation de trois problèmes isomorphes. Selon ces auteurs, contraster la structure des problèmes (sur un seul trait de structure) permet à l'apprenant de mettre en évidence les convergences pertinentes dans les exemples isomorphes à travers un processus de détection de similitudes.

Si l'on souhaite présenter à la fois des problèmes isomorphes et non isomorphes, il semble plus avantageux de présenter des exemples isomorphes ayant des traits de surface différents, mais de réutiliser ces traits de surfaces pour les autres principes (Quillici et Mayer, 2002). Dans ces conditions, les apprenants peuvent se rendre compte que les traits de surface ne sont pas suffisants pour différencier les types de problèmes. Cette présentation permet donc de distinguer les similitudes entre problèmes pertinentes pour la résolution, des similitudes fortuites.

Lorsque des problèmes isomorphes et non isomorphes sont présentés, l'ordre de présentation peut avoir un effet sur l'apprentissage. Ainsi, De Croock, Van Merriënboer et Paas (1998) manipulent l'ordre de présentation des exemples en présentant au premier groupe tous les problèmes ayant une même structure ensemble (AAABBBCCC : interférences faibles) et en mélangeant les problèmes de différents types (ABCABCABC : interférences importantes) pour le second groupe. Leurs résultats montrent que présenter les problèmes en situation d'interférence importante est la situation qui favorise le plus l'apprentissage. La présentation de problèmes mélangés semble faciliter la comparaison entre ces problèmes, ou tout au moins multiplie les occasions de comparaison.

Faire varier les traits de surface des exemples ou l'ordre de présentation d'exemples non isomorphes sont autant d'occasions de faciliter les détections de similitudes entre problèmes et de permettre aux apprenants d'identifier quelles caractéristiques apparaissant dans plusieurs exemples sont pertinentes ou non pour la résolution.

RÔLE DE LA SIMILARITÉ/DISSIMILARITÉ DES EXEMPLES UTILISÉS ET DES PROBLÈMES DONNÉS À LA SUITE

Dans les travaux que nous avons présentés, le facteur manipulé concerne la

similarité/dissimilarité des problèmes corrigés donnés aux apprenants. Dans ces travaux, après l'étude des exemples, l'apprentissage est testé en donnant aux sujets de nouveaux problèmes à résoudre, la plupart du temps éloignés de par leur habillage des exemples étudiés. Cependant, en situation « naturelle », l'apprentissage ne se limite pas en règle générale à une unique phase d'analyse d'exemples. C'est l'alternance d'analyses d'exemples et des tentatives de résolution de nouveaux problèmes qui est source d'apprentissage. Quel mécanisme est à la source de cet apprentissage ? Comment le favoriser ? Les recherches qui ont étudié cette question montrent que lorsque l'on donne un problème à résoudre, les sujets qui ne maîtrisent pas parfaitement les concepts en jeu réussissent mieux ce problème (Ross, 1984; 1987; 1989) s'il est proche de l'exemple étudié et que la réussite de ces problèmes « proches » est une source importante d'apprentissage. Ainsi, Ross et Kennedy (1990) comparent des sujets qui, après avoir étudié des exemples de probabilités, résolvent des problèmes qui en sont proches de par leur habillage (par exemple dans les exemples comme dans les problèmes il est question de mécaniciens et de voitures) à des sujets qui résolvent des problèmes plus éloignés de par leur habillage (pour ces sujets, dans les problèmes tests il est par exemple question de chevaliers et de chevaux). Les auteurs testent lors d'un deuxième post-test si les sujets ont élaboré une représentation abstraite des principes théoriques présents dans les exemples et les problèmes. Leurs résultats montrent qu'à long terme, des sujets qui ont rencontré des problèmes proches ont élaboré des connaissances moins attachées à un contexte que des sujets qui ont rencontré des problèmes éloignés. Si la généralisation produite par des processus de détection de similitude est supérieure lorsque les exemples sont contrastés de par leur habillage, ici le résultat inverse est observé : la généralisation est plus forte quand les traits de surface sont proches.

2.4. Bilan

Dans ce chapitre, nous avons cherché à identifier les conditions qui permettent de favoriser l'apprentissage en situation de résolution de problèmes.

D'après la théorie de la charge cognitive, en situation d'apprentissage l'apprenant a des ressources limitées pour traiter une tâche qu'il doit partager entre la charge cognitive intrinsèque à la tâche, la charge cognitive extrinsèque inutile imposée par l'organisation du matériel et les activités réalisées, et la charge cognitive extrinsèque pertinente pour la construction de connaissances. Selon cette théorie, l'apprentissage peut être amélioré en réduisant la charge cognitive afin de libérer des ressources pour construire des connaissances.

De notre point de vue, si le sujet doit effectivement disposer des ressources en mémoire de travail pour construire des schémas, cette condition nécessaire n'est pas suffisante. L'apprentissage ne sera effectif que si ces ressources sont utilisées pour mettre en œuvre des processus de généralisation.

Nous avons décrit un ensemble de facteurs qui, dans la littérature, semblent influencer la mise en œuvre de ces processus (certaines activités réalisées sur les exemples, certains formats de présentation des exemples, ou encore la similarité entre exemples présentés).

Ainsi, la mise en œuvre de processus de détection de similitudes semble être influencée par l'ordre des problèmes présentés, par leur similarité ou par l'activité consistant à demander de comparer les problèmes (Cummins, 1992). Si les exemples présentés sont isomorphes, des traits de surfaces différents sont plus favorables à la mise en œuvre d'un processus de détection de similitudes (Bassok, 1990 ; Bassok et Holyoak, 1989 ; Cummins, 1992 ; Gick et Holyoak, 1983 ; Quillici et Mayer, 1996). À l'inverse, si les exemples présentés ne sont pas isomorphes, des traits de surface proches semblent favoriser la détection de similitudes (Gick et Paterson, 1992 ; Pass et Van Merriënboer, 1994 ; Quillici et Mayer, 2002).

Le processus d'adaptation semble être favorisé lors de la présentation d'un exemple suivi d'un problème à résoudre très proche de l'exemple (Ross et Kennedy, 1990 ; Didierjean, 2003).

Les processus explicatifs peuvent être favorisés par une consigne qui incite les apprenants à s'auto-expliquer les exemples (Alaven et Koedinger, 2002 ; Bielaczyc, Pirolli et Brown, 1995 ; Conati et Vanlhen, 1999 ; Chi et al., 1994 ; Neuman et Schwarz, 1998), ou en leur demandant de réfléchir au « pourquoi » et au « comment » durant l'analyse des exemples (Wong et al., 2002). Ces processus peuvent également être provoqués par l'ajout d'un diagramme à du texte (Ainsworth et Loizou, 2003) ou par une structuration des exemples adéquate (Catrambone, 1995, 1996, 1998).

Par ailleurs, si certaines activités et certains formats de présentations semblent favoriser la mise en œuvre de processus de généralisation, il est nécessaire de prendre en compte l'interaction entre format de présentation et activités réalisées sur les exemples. En effet, il semble qu'il y ait des interactions importantes entre les facteurs présentés. Par exemple, d'après les études présentées ici, lorsque deux exemples sont fournis, si les apprenants les comparent, il semble préférable que leurs traits de surface soient éloignés, alors que si les apprenants s'auto-expliquent chaque exemple, la similarité/dissimilarité des problèmes semble sans importance.

Nous voulons vérifier d'une part que certains facteurs influent effectivement sur la mise en œuvre de processus de généralisation, et d'autre part qu'il est possible de manipuler ces facteurs pour déclencher la mise en œuvre de ces processus.

Nous avons choisi d'approfondir dans les chapitres suivant deux questions. Tout d'abord, si la structuration des exemples semble avoir une importance déterminante sur les processus mis en jeu, qu'en est-il de la structuration des problèmes à résoudre ? Une étude réalisée par Gick et McGarry (1992) montrent que la saillance des traits de structure influence l'apprentissage. À travers quatre expériences présentées dans le chapitre 3, nous testons différentes hypothèses susceptibles d'expliquer ce résultat.

Dans le chapitre 4, nous présenterons une recherche sur les effets conjugués de l'activité réalisée sur les problèmes d'une part et de la similarité entre problèmes d'autre part sur la mise en œuvre de différents processus.

Chapitre 3 : Induction de processus d'apprentissage

en vertu de la loi du droit d'auteur.

et saillance des traits de structures

La plupart des recherches portant sur la résolution de problèmes par analogie se sont intéressées au rôle des similarités de surfaces entre le problème source et le problème cible (voir Reeves et Weisberg, 1994, pour une revue de questions). Il semble que certains facteurs intra-problèmes jouent également un rôle. Dans cette étude, nous nous intéressons au rôle d'un facteur en particulier : la saillance des traits de structure du problème source. Une recherche sur ce thème réalisée par Gick et McGarry (1992) montre que rendre peu saillants les éléments les plus importants des énoncés des problèmes favorise la résolution d'un problème cible. Selon nous, ce facteur pourrait favoriser la mise en œuvre de processus de généralisation.

Après avoir présenté l'étude réalisée par Gick et McGarry (1992), nous présenterons les différentes hypothèses susceptibles d'expliquer l'effet observé puis nous décrirons quatre expériences que nous avons réalisées pour tester ces hypothèses.

3.1. Présentation de l'étude de Gick et McGarry (1992)

En 1992, Gick et McGarry montrent qu'outre les traits de surface du problème, un autre facteur semble déterminant dans le transfert analogique : la saillance des traits de structure dans la source. Ces auteurs réalisent une recherche dans laquelle les sujets doivent résoudre le problème dit « problème de l'échiquier » (Kaplan et Simon, 1990). Ce problème, présenté en Figure 10, est un problème difficile que peu de sujets réussissent à résoudre (Kaplan et Simon, 1990). Dans ce problème, les sujets doivent juger si un échiquier dont deux coins opposés ont été retirés peut être recouvert par des dominos dont la taille correspond à deux cases de l'échiquier. La résolution correcte de ce problème nécessite de mettre en avant la notion de parité : un domino couvre toujours deux cases adjacentes, une noire et une blanche, or deux cases noires et un domino ont été retirés. Même si le nombre total de cases correspond exactement au nombre de demi-dominos, le problème est impossible puisqu'il restera à la fin un domino et deux cases blanches. Gick et McGarry (1992, Expérience 1) montrent tout d'abord, de manière classique, que lorsque l'on donne, préalablement à la résolution du problème de l'échiquier, un problème isomorphe dont la solution est trouvée par tous les sujets (le problème dit « problème du bal » : Figure 11), on n'observe pas de transfert spontané du premier problème sur le second (cf. Gick et Holyoak, 1980 ; 1983).

Gick et McGarry (1992, Expérience 2 et 3) montrent cependant que le degré de complexité de la source semble jouer un rôle déterminant dans le taux de transfert spontané. Les auteurs donnent aux sujets à résoudre en source un problème isomorphe au problème de l'échiquier : le problème « du dîner », en faisant varier le degré de complexité de ce problème. Une moitié des sujets le passe dans une version « facile » où la notion de parité est mise en avant (Figure 12), et l'autre moitié dans une version plus « difficile » où la notion de parité est moins mise en avant¹. La différence entre les deux

versions réside uniquement dans la plus ou moins grande mise en avant de l'élément pertinent pour la résolution : la parité. Dans la version facile, cet élément est davantage mis en avant que dans la version difficile (à noter qu'aucune des deux versions n'est plus proche que l'autre de la cible en terme de traits de surface). Les auteurs montrent que, par rapport aux sujets qui ont eu la version facile en problème source, les sujets qui ont passé la version difficile commettent plus d'erreurs sur le problème source (absence de référence à la parité) mais réussissent ensuite mieux le problème de l'échiquier en cible. Ainsi, si les traits de surface semblent jouer un rôle dans le transfert spontané, rendre peu saillant l'élément structural important dans la source semble également déterminant.

Soit un échiquier et 32 dominos. Chaque domino couvre exactement deux cases adjacentes de l'échiquier. Avec 32 dominos on peut donc couvrir l'ensemble des 64 cases de l'échiquier. Supposons maintenant qu'on retire deux coins diagonalement opposés de l'échiquier, et un domino. Si vous jugez cela possible, montrez comment vous placeriez sur l'échiquier les 31 dominos restants, de manière à ce que les 62 cases restantes soient entièrement recouvertes. Si vous jugez que cela est impossible, prouvez-le.

¹ Pour la lisibilité du texte, nous avons rebaptisé les deux problèmes utilisés par Gick et McGarry que nous reprenons ici. Le problème que nous nommons « facile » correspond au problème « verbal plus diagram » et le problème "difficile" correspond au problème « diagram only ».

Soit un échiquier et 32 dominos. Chaque domino couvre exactement deux cases adjacentes de l'échiquier. Avec 32 dominos on peut donc couvrir l'ensemble des 64 cases de l'échiquier. Supposons maintenant qu'on retire deux cases diagonalement opposées de l'échiquier, et un domino. Si vous jugez cela possible, montrez comment vous placerez sur l'échiquier les 31 dominos restants, de manière à ce que les 62 cases restantes soient entièrement recouvertes. Si vous jugez que cela est impossible, prouvez-le.

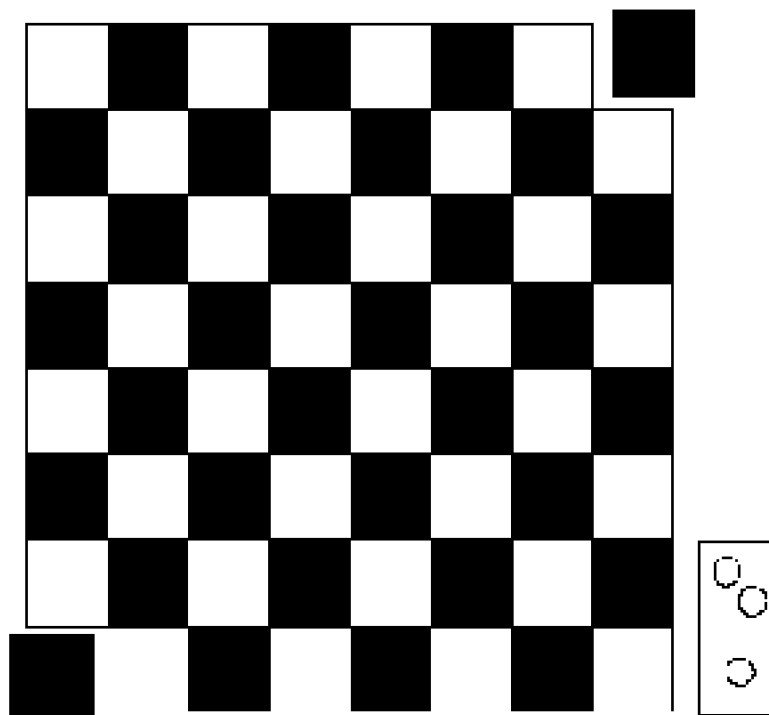


Figure 10 : Le problème de l'échiquier tronqué

Un samedi soir, dans une salle de bal, 40 personnes, 20 hommes et 20 femmes, se mettent à danser la valse. De 8 heures à 10 heures se forment 20 couples hétérosexuels (composé d'un homme et d'une femme, deux hommes ou deux femmes ne peuvent pas danser ensemble) qui dansent la valse. A 10 heures, deux femmes s'en vont, il reste alors 18 danseurs dans la salle de bal. Ces 38 personnes restantes peuvent-elles se réorganiser de manière à former 19 couples hétérosexuels de danseurs ? Répondez par oui ou non, et expliquez votre réponse.

Figure 11 : Le problème du bal

La version facile du problème du dîner (worded plus diagram version)

Trente six personnes, 18 hommes et 18 femmes, sont à un dîner. Ces 36 personnes sont assises à 18 tables, comme l'illustre le schéma ci-dessous. À chaque table sont assises deux personnes, un homme et une femme, qui sont installés en face l'un de l'autre (horizontalement ou verticalement sur le schéma).

Si deux femmes s'en vont, comme le montrent les flèches sur le schéma, peut-on installer 17 tables pour que soient installées les 34 autres personnes ? Les personnes ne sont pas autorisées à se déplacer. Expliquez votre raisonnement.

La version difficile du problème du dîner (diagram only version)

Trente six personnes, 18 hommes et 18 femmes, sont à un dîner. Ces 36 personnes sont assises à 18 tables, comme l'illustre le schéma ci-dessous. À chaque table sont assises deux personnes, qui sont installées en face l'une de l'autre (horizontalement ou verticalement sur le schéma).

Si deux personnes s'en vont, comme le montrent les flèches sur le schéma, peut-on installer 17 tables pour que soient installées les 34 autres personnes ? Les personnes ne sont pas autorisées à se déplacer. Expliquez votre raisonnement.

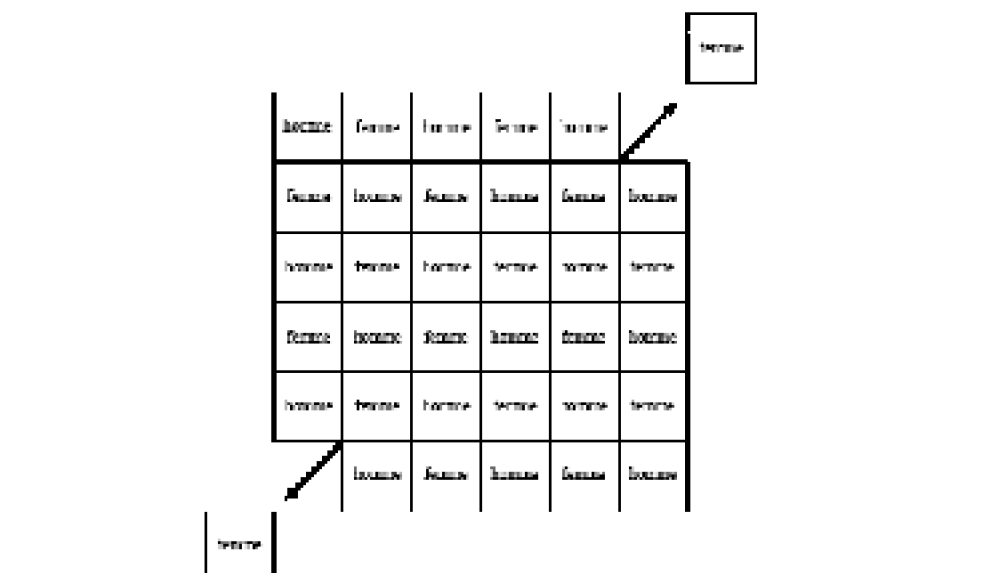


Figure 12 : Le problème du dîner.

Pour bien comprendre la solution il est important de remarquer que, puisque chaque table réunit deux personnes qui sont l'une à côté de l'autre, chaque table réunit nécessairement une femme et un homme.

Puisque deux femmes s'en vont, il reste moins de femmes que d'hommes. Ainsi, puisque qu'une table réunit nécessairement une femme et un homme et qu'il y a moins de femmes que d'hommes, alors avec les 17 tables on ne pourra pas installer les 34 personnes.

Figure 13 : Solution du problème du dîner

Selon Gick et McGarry (H1) ce résultat tient à ce que, puisque la cible utilisée est un problème difficile, rendre également difficile la source favorise le transfert en ce que cela augmente la probabilité que les sujets prennent conscience de l'existence d'un lien entre la source et la cible. Ainsi, une source difficile pourrait être favorable en ce qu'elle conduit les sujets à réaliser des erreurs, et les erreurs réalisées lors de la résolution de la source et de la cible amènent les sujets à se rendre compte de l'existence d'une similarité entre le

problème source et le problème cible. Gick et McGarry (1992, p. 635) avancent ainsi : « *For example, if subjects are attempting covering solutions that they think should work in the checkerboard target problem, but all solutions seem to fail, they may notice a similarity to failures that occurred in the source problem (e.g., two squares are always left over)* ». Pour appuyer leur interprétation, Gick et McGarry accordent une attention toute particulière à un type d'erreur : les erreurs de non parité. Ces erreurs consistent à proposer une réponse qui ne fait pas référence à la notion de parité. Selon cette optique, le rôle des erreurs de non parité pourrait jouer un rôle « d'indice de récupération » favorisant la récupération de la source.

D'après nous, deux autres hypothèses pourraient également expliquer ces résultats.

Selon une seconde hypothèse (H2), rendre peu saillant l'élément pertinent pour la résolution pourrait améliorer le transfert en ce que les sujets mémoriseraient mieux la source et sa solution lorsqu'ils rencontrent des difficultés dans la résolution. Ainsi, Patalano et Seifert (1994) ont montré que les participants étaient meilleurs pour se remémorer des problèmes s'ils les avaient résolus en commettant des erreurs plutôt que correctement.

Selon une troisième hypothèse (H3), rendre peu saillant l'élément pertinent pour la résolution pourrait jouer un rôle en ce que ce changement induit chez les sujets l'élaboration d'un schéma. A titre d'illustration, dans l'Experience 1 de Gick et McGarry, lorsque les sujets reçoivent en source le problème du bal on peut penser que, quel que soit le niveau de mémorisation de cette source, les sujets échouent sur la cible faute d'avoir pu dégager des traits de surface « couple homme/femme » le concept de parité et son importance pour la résolution. Ainsi, selon cette hypothèse, rendre peu saillant l'élément structural important dans la source conduit les sujets à construire une représentation de la solution où cet élément est intégré de manière plus abstraite. Cette manipulation expérimentale pourrait notamment inciter les sujets du groupe « source difficile » à s'interroger sur le rôle de la parité, et ainsi à généraliser davantage via la mise en œuvre de processus explicatifs (Catrambone, 1995 ; 1996 ; DeJong et Mooney, 1986 ; Mooney, 1990). En s'interrogeant sur le rôle de l'élément structural qu'ils n'ont pas pris en compte, les sujets construiraient une représentation de la source dans laquelle les éléments « deux femmes s'en vont » pourraient être remplacés par une connaissance plus abstraite telle que « deux éléments semblables s'en vont » (cf. pour ce type de phénomène de généralisation Sander et Richard, 1997 ; Schank, 1982).

3.2. Présentation des expériences

Pour mettre à l'épreuve ces différentes hypothèses, nous avons réalisé quatre expériences. Dans la première expérience nous avons étudié l'influence des erreurs sur la résolution de la cible (hypothèse 1) et en particulier le rôle d'un type d'erreurs (les erreurs de non parité). Nous supposons que si, comme le suggèrent Gick et McGarry, la production de ce type d'erreurs joue un rôle privilégié dans la prise de conscience d'un lien entre la source et le problème transfert, on devrait observer un transfert spontané plus important chez les sujets ayant fait ce type d'erreurs.

Dans l'Expérience 2 nous avons étudié si l'influence de la difficulté de la source dans le transfert analogique subsiste en situation de transfert indicé. Notre prédiction était que si, comme le suggère la première hypothèse, rencontrer une source difficile facilite le raisonnement par analogie uniquement parce que cela favorise la prise de conscience entre la source et la cible (par exemple parce que les sujets réalisent des erreurs communes dans les deux problèmes), alors la différence entre les deux groupes doit disparaître dès lors que les sujets ne sont plus en situation de transfert spontané. Si, à l'inverse, le rôle de rendre peu saillant l'élément structural important est de favoriser l'élaboration d'une connaissance intégrant la parité de manière abstraite (hypothèse 3), la différence doit se maintenir en transfert indicé.

L'expérience 3 testait spécifiquement l'hypothèse du rôle de la saillance des traits de structure dans la généralisation des connaissances. Après avoir rencontré l'une des deux sources utilisées dans les expériences précédentes, les sujets devaient effectuer une tâche de catégorisation. Leur tâche était de catégoriser différentes versions du problème de l'échiquier selon que ces problèmes leur paraissaient structurellement semblables ou non au problème du dîner. Notre prédiction dans cette expérience était que, si les sujets du groupe « difficile » ont élaboré une connaissance dans laquelle la parité est intégrée de manière abstraite (en intégrant par exemple que deux éléments identiques sont retirés et non deux femmes), ils devraient alors davantage catégoriser les problèmes sur la base des traits de structure (Chi, Feltovich et Glaser, 1981; Cummins, 1992).

Enfin, une quatrième expérience vise à explorer le rôle de la solution du problème source dans la généralisation de connaissances.

3.2.1. Expérience 1 : Quelle est l'influence des erreurs sur la résolution du problème cible ?

L'objectif de cette expérience est d'étudier le rôle des erreurs sur les performances obtenues au problème cible. Selon Gick et McGarry, puisque la cible utilisée est un problème difficile, rendre également difficile la source conduirait les sujets à faire des erreurs communes dans les deux problèmes. Ces erreurs communes favoriseraient la prise de conscience d'une relation entre la source et la cible. Les erreurs joueraient ainsi un rôle « d'indice de récupération ».

Pour appuyer cette hypothèse, ces auteurs réalisent une analyse des erreurs commises en source et en cible. Ils portent une attention particulière aux réponses pour lesquelles les sujets proposent une solution qui ne prend pas en compte la parité (le concept clé pour la résolution), c'est à dire l'égalité numérique initiale des éléments « homme/femme » et la rupture de la parité entre ces deux éléments. Ces réponses, qualifiées d'erreurs de « non-parité » (*nonparity solution failures*), reflètent une représentation erronée du problème source. D'après ces auteurs, ces erreurs joueraient un rôle particulier dans le transfert. Ainsi, Gick et Mc Garry (1992, p. 631) avancent : « *A crucial prediction was that subjects would produce more nonparity solution failures to the diagram-only version [la version « difficile »] of the dinner party problem than to the verbal versions [la version « facile »].* » Leurs résultats confirment bien cette hypothèse : le nombre d'erreurs de « non-parité » est supérieur pour le groupe ayant eu la version

difficile de la source. Selon nous, une deuxième prédiction, tout aussi « cruciale » peut être faite : la supériorité d'un groupe sur l'autre au problème cible doit être due à la différence de proportion en erreurs de « non-parités » observée sur la source.

Or dans leur article, Gick et McGarry ne donnent pas d'informations permettant de mettre en liaison les réponses en source et en cible. Aussi, nous avons répliqué à l'identique l'expérience de Gick et Mc Garry (1992) dans le but de procéder à cette analyse importante : la mise en relation des erreurs réalisées en source et de la réussite en cible. Si les erreurs de « non parité » jouent un rôle dans le transfert, les sujets ayant fait ce type d'erreurs en source devraient d'avantage réussir le problème cible que les autres sujets.

Dans cette expérience, qui comporte quatre étapes, nous avons d'abord présenté l'une des deux versions (facile vs difficile) du problème du dîner, puis sa solution. Ensuite nous avons présenté le problème de l'échiquier en situation de transfert spontané. Puis une tâche de rappel de la source a permis de vérifier que les réponses incorrectes au problème de l'échiquier n'étaient pas causées par une mauvaise mémorisation du problème source. Enfin, le problème était de nouveau présenté en situation de transfert indicé. Lors de l'analyse des résultats, nous avons identifié le type d'erreurs commises sur le problème source que nous avons mis en relation avec les réponses produites en transfert spontané.

MÉTHODE

Participants

100 étudiants (d'âge moyen 19 ans, écart-type : 17 mois) en première année de licence MIAS et SVT de l'université Claude Bernard à Lyon ont participé à cette expérience. Aucun des sujets n'avait entendu parler avant l'expérience du problème de l'échiquier tronqué.

Matériel

Trois problèmes différents étaient utilisés : une version française du problème de l'échiquier (Figure 10) ainsi que la version « facile » (verbal-plus-diagram version) et la version « difficile » (diagram-only version) du problème du dîner (adaptées en français de l'article de Gick et McGarry . (Figure 12). Dans la version « difficile » les mots « deux femmes s'en vont » étaient remplacés par « deux personnes s'en vont » et la phrase « un homme et une femme » était omise ; les informations nécessaires à la solution de parité sont donc identifiables uniquement sur le graphique.

Procédure

Cette expérience se déroulait en groupe de 20 à 30 personnes (chacun des sujets résolvait seul les problèmes). Les sujets étaient informés qu'ils allaient devoir effectuer à la suite un certain nombre de problèmes. Les sujets étaient affectés aléatoirement à l'une des deux conditions : source « facile » ou source « difficile ». Il leur était remis le premier

problème ainsi qu'un stylo et il leur était demandé de lire attentivement l'énoncé, de s'aider du graphique pour résoudre le problème et de ne pas hésiter à annoter la feuille qui leur était fournie. Les sujets disposaient de 5 minutes pour tenter de résoudre le problème source. S'ils trouvaient la solution, on leur demandait de l'écrire sur une feuille qui leur était également remise. A l'issue des 5 minutes, les sujets recevaient une feuille comportant la solution du problème source (Figure 12) et il leur était demandé de lire attentivement la solution, puis une fois que celle-ci leur paraissait bien comprise, de la réécrire au dos de la feuille avec leurs mots à eux.

Ensuite, les sujets des deux groupes devaient résoudre le problème de l'échiquier. En leur remettant le problème, l'expérimentateur renouvelait les consignes données pour la source. Un temps maximum de 5 minutes était laissé aux sujets. A l'issue de cette phase, l'expérimentateur demandait aux sujets de rappeler par écrit la solution du problème source. Ensuite le problème de l'échiquier tronqué était de nouveau présenté accompagné des mêmes consignes en insistant cette fois sur un point important : « *ce problème est très proche de celui que vous venez de résoudre. Lors de sa résolution essayez de vous rappeler de la solution de celui que vous venez de passer, celle-ci va vous aider pour la résolution de ce nouveau problème.* ». Enfin l'expérimentateur leur demandait s'ils avaient déjà eu connaissance de l'un ou l'autre problème avant l'expérience.

RÉSULTATS

Afin de nous assurer que les résultats ne soient pas biaisés par une difficulté de compréhension de la solution du problème source, nous n'avons pas analysé les protocoles des sujets qui ont commis des erreurs lors de la réécriture de la solution de ce problème ; 11 protocoles n'ont pas été analysés (5 sujets dans le groupe facile, 6 dans le groupe difficile). Notre analyse porte donc sur 89 protocoles.

Les solutions proposées par les sujets ont été codées à partir des critères utilisés par Gick et McGarry (1992). Quatre catégories de réponses étaient distinguées : (1) réponses justes, (2) absence de référence à la parité (« *nonparity solution failure* »), (3) identification d'une caractéristique de la réponse seulement (« *one feature solution failure* »), et (4) autres types de réponses (« *autre* »).

Ainsi, par exemple, pour le problème du dîner :

(1) Une réponse était codée comme correcte si elle contenait au moins deux des éléments suivants : (a) un homme et une femme sont assis à chaque table, (b) deux femmes s'en vont, (c) reste deux hommes qui ne peuvent pas s'asseoir à la même table.

(2) Les réponses de type « *nonparity solution failures* » (erreurs de non parité) ne faisaient aucune allusion à la notion de parité, et proposaient une autre représentation du problème, par exemple : « *ce n'est pas possible car si on enlève une table, il faut avoir deux places consécutives libres, or ceci est impossible d'après le schéma si les gens ne bougent pas.* ».

(3) Les réponses de type « *One-feature solution failures* » (« *erreurs un trait* ») ne contenaient qu'un seul des trois éléments correspondant à la parité, par exemple : « *ce*

n'est pas possible vu que le nombre d'hommes est supérieur à celui des femmes et qu'ils ne sont pas autorisés à se déplacer ».

(4) Les autres réponses incorrectes incluaient les réponses qui considéraient que le problème était possible (par exemple en violant des contraintes du problème), les feuilles blanches ou les réponses non claires.

Performances au problème source

La Figure 13 présente les patterns de résultats obtenus sur le problème source. Les résultats montrent, comme attendu, que les sujets ayant eu la version « difficile » du problème du dîner ont moins produit la solution correcte que les sujets ayant eu la version « facile » (4,3% vs 23,2%), $\chi^2(1, N=89) = 6.810, p < .01$. Nos résultats répliquent également la prédiction « cruciale » de Gick et McGarry : les sujets ayant eu la version « difficile » du problème du dîner ont commis plus d'erreurs de non parité (21,7% vs. 7%) que les autres sujets, $\chi^2(1, N=89) = 3.880, p < .05$.

Cependant, les participants rendaient le plus souvent une feuille blanche ou légèrement annotée. Les réponses de type « autre » (57% des réponses) étaient donc les plus fréquentes.

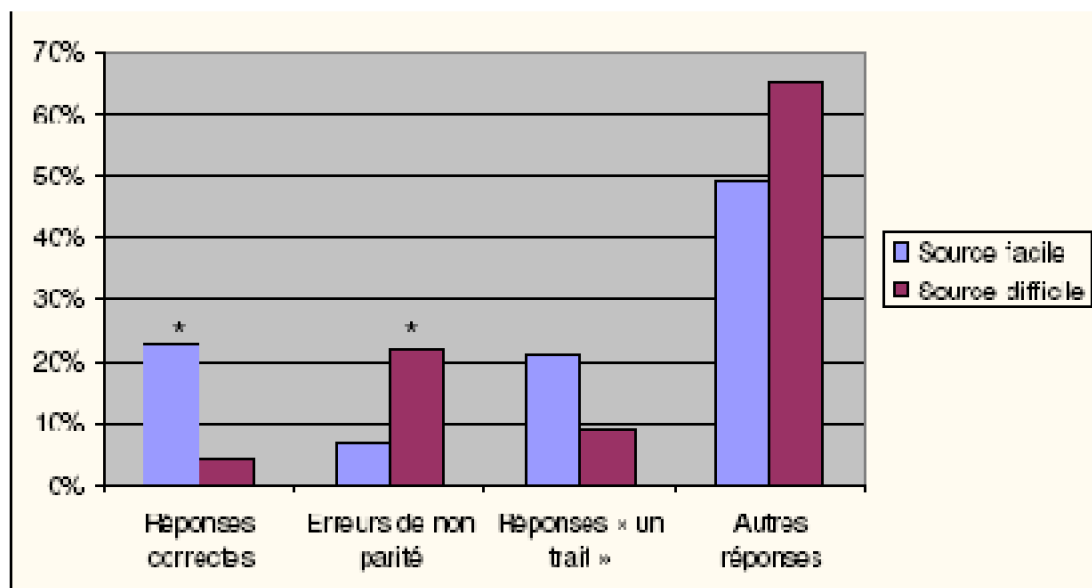


Figure 13 : Fréquence des différents types de réponses produites pour le problème source

Performance au problème cible

Le groupe ayant eu la version « difficile » du problème source a un taux de transfert supérieur au groupe ayant eu la version « facile » du problème du dîner (45,6% vs 18,6%), $\chi^2(1, N=89) = 7.400, p < .01$. Ces résultats répliquent parfaitement les résultats de Gick et McGarry (1992).

Relation entre les erreurs réalisées sur la source et la réussite en cible

Nous avons mis en liaison la réussite ou l'échec sur la source et la réussite aux problèmes cibles. Les relations entre les réponses au problème source et les réponses au problème cible pour chacun des deux groupes sont présentées dans le Tableau 1. Notons d'abord que parmi les 12 sujets qui réussissent le problème source, seuls trois réussissent le problème cible. Ensuite, le résultat principal de notre recherche concerne la mise en relation entre les erreurs de « non-parité » réalisées en source et la réussite en cible. Nos résultats montrent que même si les sujets ayant eu une source difficile font plus d'erreurs de non parité que les sujets ayant eu une source facile, aucun lien n'est observé entre les erreurs de non parité commise sur le problème source et la réussite du problème cible. Tous groupes confondus, seuls 23% des sujets faisant ce type d'erreurs en source réussissent ensuite la cible, contre 25% de réussite en cible pour les sujets ayant produit d'autres types de réponses erronées ($\chi^2(1, N=77) = 0.800, p = .37$).

			Problème cible				
			Solution correcte	Erreurs de non parité	Erreurs « un traitement »	Autre	IT
Problème source	Facile	Solution correcte	2	2	1	3	10
		Erreurs de non parité	1	2	0	1	3
		Erreurs « un traitement »	1	2	1	1	5
		Autre	4	2	2	13	21
		N	8	8	4	18	43
	Difficile	Solution correcte	1	0	0	1	2
		Erreurs de non parité	2	6	0	2	10
		Erreurs « un traitement »	0	3	0	1	4
		Autres réponses	13	3	0	7	30
		N	21	12	0	13	46

Tableau 1 : Pattern des réponses en source et cible pour les sujets des deux groupes.

Rappel du problème source

Le rappel de la source a été codé de manière binaire (pour la solution, les mêmes critères que ceux utilisés précédemment ont été utilisés). Aucune différence entre les deux groupes n'a été observée (100% de rappel correct dans les deux groupes).

Transfert indicé

Seules les réponses des sujets n'ayant pas résolu correctement le problème de l'échiquier en transfert spontané ont été analysées. Comme dans l'étude de Gick et McGarry, l'analyse des performances en situation de transfert indicé ne montre pas de différence significative entre deux groupes : le groupe facile obtient 60% de réussite en transfert indicé contre 76% de réussite pour le groupe difficile ($\chi^2(1, N=60)=1.680, p=.1949$).

DISCUSSION

Cette expérience avait pour objectif d'étudier le rôle des erreurs commises lors de la résolution du problème source sur les performances du problème cible. D'après Gick et McGarry, les erreurs, et plus particulièrement les erreurs de non parité, jouent un rôle dans le transfert analogique. Pour justifier cette hypothèse, ils montrent que le groupe qui a de meilleures performances au problème cible produit plus un type d'erreurs, les erreurs de non parité. Si cette hypothèse est vraie, on devrait également observer que les sujets qui produisent ce type d'erreur en source réussissent mieux le problème cible.

Pour tester cette hypothèse, nous avons répliqué l'expérience de Gick et McGarry. Tout d'abord, nos résultats répliquent parfaitement ceux de Gick et McGarry. Le groupe difficile réussit moins bien le problème source, commet plus d'erreurs de non parité et il obtient un pourcentage de réussite plus élevé en transfert spontané que le groupe facile. Il est tout d'abord à noter que, si la version « facile » est effectivement mieux réussie par les sujets que la version « difficile », en terme de réussite ou d'échec les deux versions du problème source sont en moyenne difficiles. Très peu de sujets réussissent la source. La différence observée entre les deux groupes sur la cible ne peut donc être attribuée uniquement à la différence de proportion dans la réussite en source pour les deux groupes.

Ensuite, nous avons mis en relation la réussite en cible et les erreurs en source. Nous n'observons aucun lien entre les erreurs de non parité et la réussite. Si les sujets du groupe difficile font plus d'erreurs de type « non parité », les sujets qui font ce type d'erreur ne réussissent pas davantage à résoudre la cible que les sujets faisant d'autres types d'erreurs.

Ainsi, Cette expérience contredit clairement l'assertion de Gick et McGarry sur le rôle des erreurs. Si rendre moins saillant l'élément pertinent pour la résolution conduit les sujets à commettre plus d'erreurs de non parité, et augmente la réussite du problème cible, la réussite au problème source ne peut s'expliquer par un rôle des erreurs commises dans la version difficile du source. Dans cette expérience, les erreurs de non parité ne jouent un rôle d'indice de récupération de la source.

3.2.2. Expérience 2 : La saillance des traits de structures conduit-elle à

prendre conscience du lien entre source et cible ?

Rappelons qu'afin d'expliquer le rôle de la saillance des traits de structure sur la réussite d'un problème cible, nous proposons trois hypothèses. Selon une première hypothèse, réduire la saillance des éléments pertinents pour la résolution du problème source augmente la réussite du problème cible car cela favorise la prise de conscience par les sujets de l'existence d'un lien entre la source et la cible (par exemple en faisant des erreurs similaires dans les deux problèmes). Selon la seconde hypothèse, réduire la saillance des éléments pertinents favorise une meilleure mémorisation de la source. Selon la troisième hypothèse, réduire la saillance des éléments pertinents favorise la réussite de la cible car les sujets construisent une connaissance plus générale à partir de la source.

Dans l'expérience 1, nous avons étudié le rôle des erreurs dans la réussite de la source en répliquant l'expérience de Gick et McGarry. Cette expérience n'a pas montré de lien entre les erreurs commises sur la source et la réussite du problème cible. Si, comme le suggère la première hypothèse, la version difficile du problème source favorise la prise de conscience d'un lien entre source et cible, nos résultats montrent que les erreurs commises sur le problème source ne semblent pas jouer un rôle dans cette prise de conscience.

Dans l'expérience 2, nous testons spécifiquement l'effet de la saillance des traits de structure sur la prise de conscience du lien entre source et cible. Si rendre peu saillant l'élément structural important conduit les sujets à prendre conscience de l'utilité de la source pour résoudre la cible, la différence entre les deux groupes devrait disparaître dès lors que les sujets sont informés du lien entre les problèmes source et cible. Si, au contraire, rendre peu saillant l'élément important améliore la mémorisation de la source ou l'élaboration d'une représentation abstraite, la différence entre les deux groupes devrait se maintenir.

Il est à noter que, dans la recherche Gick et McGarry (1992), lorsque les sujets n'ont pas transféré spontanément dans la première phase, ils sont informés du lien entre source et cible dans une deuxième phase et doivent tenter à nouveau de résoudre le problème cible. Cette phase venant à la suite du transfert spontané et ne concernant que les sujets qui n'ont pas réussi le problème dans la première phase, il est difficile d'en tirer une conclusion. Aussi, dans cette expérience, nous avons choisi d'informer les sujets de l'utilité de la source pour résoudre la cible directement après avoir passé le problème du dîner dans sa version « facile » ou « difficile » (situation de transfert indicé).

Les sujets cherchent donc à résoudre l'une des deux versions du problème du dîner, étudient sa solution, puis passent le problème de l'échiquier en étant informés de l'intérêt d'utiliser le problème source pour résoudre le problème cible.

MÉTHODE

Participants

Les participants étaient 90 étudiants de première et deuxième année de psychologie de l'université de Provence (Aix en Provence). Ils avaient un âge moyen de 20 ans et 4 mois

(écart type 14 mois). Aucun des sujets n'avait entendu parler avant l'expérience du problème de l'échiquier tronqué.

Matériel

Comme dans l'expérience 1, trois problèmes différents étaient utilisés. Une version française du problème de l'échiquier (Figure 10) et les deux versions du problème du dîner utilisées par Gick et McGarry adaptées en français (Figure 12).

Procédure

Tous les sujets étaient testés par groupe de deux (chacun des sujets résolvait seul les problèmes) et étaient informés qu'ils allaient devoir effectuer à la suite un certain nombre de problèmes. Les sujets étaient affectés de manière aléatoire à l'une de deux conditions : source « facile » ou source « difficile ». Il leur était remis le premier problème ainsi qu'un stylo. Il leur était demandé de lire attentivement l'énoncé, de s'aider du graphique pour résoudre le problème, et de ne pas hésiter à annoter la feuille qui leur était fournie. Les sujets disposaient de 5 minutes pour tenter de résoudre le problème source. S'ils trouvaient la solution on leur demandait de l'écrire sur une feuille qui leur était également remise. A l'issue des cinq minutes, les sujets recevaient une feuille comportant la solution du problème source (Figure 13) et il leur était demandé de lire attentivement la solution, puis une fois que celle-ci leur paraissait bien comprise, de la réécrire au dos de la feuille avec leurs mots à eux.

Après cette phase, les sujets des deux groupes devaient résoudre le problème de l'échiquier. En leur remettant le problème, l'expérimentateur renouvelait les consignes données pour la source puis il attirait l'attention sur un point important : « *ce problème est très proche de celui que vous venez de résoudre. Lors de sa résolution, essayez de vous rappeler de la solution de celui que vous venez de passer, celle-ci va vous aider pour la résolution de ce nouveau problème.* ». Un temps maximum de 5 minutes était laissé aux sujets. A l'issue de cette phase, l'expérimentateur leur demandait de rappeler par écrit la solution du problème source. Enfin, il leur demandait s'ils avaient déjà eu connaissance de l'un ou l'autre problème avant l'expérience.

RÉSULTATS

Comme dans l'expérience 1, les réponses des participants ont été codées à partir des critères utilisés par Gick et McGarry (1992).

Performance au problème source

Les résultats sur les problèmes sources montrent, comme attendu, que les sujets ayant eu la version « difficile » du problème du dîner ont moins produit la solution correcte de parité que les sujets ayant eu la version « facile » (4,5% vs 28, 9%), $G^2(1, N=90) = 9.68$, $p < .01$.

La réécriture de la solution demandée immédiatement après la tentative de résolution de la source a également été codée. Aucune différence n'est observée entre les sujets

des deux groupes (88,8% en version difficile vs 95,5% en version facile), $G^2(1, N=90) = 1.40$, $p = .30$.

Performance au problème cible

On observe un taux de transfert indicé supérieur pour le groupe ayant eu la version « difficile » du problème du dîner en source par rapport au groupe ayant eu la version « facile » du problème du dîner (40% vs 17,8%), $G^2(1, N=90) = 5.41$, $p < .05$.

Nous avons également mis en liaison la réussite ou l'échec sur la source et la réussite aux problèmes cibles. Comme dans l'expérience 1, sur l'ensemble des deux groupes, très peu de sujets réussissent les problèmes sources (15 sujets sur 90, 13 dans le groupe « source facile » et 2 dans le groupe source « difficile »), et, parmi ces 15 sujets, 5 seulement réussissent le problème cible.

Relation entre les erreurs réalisées sur la source et la réussite en cible

Les relations entre le pattern observé en source et le pattern observé en cible pour les deux groupes sont présentées dans le Tableau 2 : Pattern des réponses en source et cible pour les sujets des deux groupes.. Comme dans la recherche de Gick et McGarry, les sujets ayant eu une source difficile font plus d'erreurs de non parité que les sujets ayant eu une source facile (31% vs. 9%), $G^2(1, N= 90) = 6.94$, $p < .01$. Cependant, comme dans l'expérience 1, aucun lien n'est observé entre ce type de pattern d'erreur en source et la réussite en cible. Tous groupes confondus, seuls 28% des sujets faisant des erreurs de non parité en source réussissent ensuite la cible, contre 29% de réussite en cible pour les autres patterns ($G^2(1, N= 90) = .01$, $p = .91$).

			Problème cible				
			réponse correcte	Erreur de non-parité	Erreur « un trait »	Autre	N
Problème source	facile	Solution correcte	1	5	3	2	13
		Erreur de non-parité	1	4	0	0	4
		Erreur « un trait »	2	3	1	0	5
		Autre	2	12	2	6	22
		N	3	24	5	8	45
	difficile	Solution correcte	1	1	0	0	2
		Erreur de non-parité	3	3	0	1	14
		Erreur « un trait »	1	4	0	0	5
		Autres réponses	11	9	1	3	24
		N	13	22	1	4	45

Tableau 2 : Pattern des réponses en source et cible pour les sujets des deux groupes.

Rappel du problème source

L'analyse du rappel de la source demandé à l'issue de la résolution de la cible ne montre aucune différence entre les deux groupes (G^2 (1, N= 90) = .56, p = .45).

DISCUSSION

Dans cette expérience, nous avons testé l'hypothèse selon laquelle réduire la saillance des éléments pertinents pour la résolution du problème favorise uniquement la prise de conscience de l'existence d'un lien entre la source et la cible. Si cette hypothèse est vraie, informer les participants de l'existence d'un lien entre source et cible devrait faire disparaître la différence entre les deux groupes.

Dans cette expérience, nous avons donc répliqué l'expérience de Gick et McGarry en informant immédiatement les participants de l'intérêt d'utiliser le problème source pour

résoudre le problème cible. Les résultats montrent que malgré cette indication, la différence entre les deux groupes (version facile / difficile du problème du dîner) persiste. Les performances supérieures obtenues après l'étude du problème source « difficile » ne s'expliquent donc pas seulement par une prise de conscience de l'utilité de la source pour résoudre la cible lorsque les traits de structure sont peu saillants. En revanche, les deux autres hypothèses alternatives, rendre peu saillant l'élément important améliore la mémorisation de la source (H2) ou l'élaboration d'une représentation abstraite (H3), peuvent expliquer la persistance de cette différence en situation de transfert indicé.

L'expérience 3 vise à tester ces hypothèses alternatives en observant le degré de généralité de connaissances élaborées par les participants après l'étude de la source.

3.2.3. Expérience 3 : saillance des traits de structure et généralisation des connaissances

Trois hypothèses ont été proposées pour expliquer le rôle de la saillance de l'élément important pour la résolution. La première hypothèse selon laquelle les erreurs induites par la version difficile augmentent la prise de conscience de l'existence d'une similarité entre source et cible est remise en cause. Les expériences 1 et 2 ne mettent pas en évidence le rôle des erreurs et montrent que la différence entre les deux groupes n'est pas due uniquement à une prise de conscience du lien entre source et cible.

Selon la seconde hypothèse (H2), la supériorité des performances du groupe ayant cherché à résoudre le problème difficile peut tenir à ce que les sujets mémorisent mieux la source et sa solution quand ils ont rencontré des difficultés. Notons toutefois que dans les expériences 1 et 2, les deux groupes ne se différencient pas lors de la tâche de rappel de la source qui succède à la résolution du problème cible.

Selon la troisième hypothèse (H3), la différence observée peut tenir à ce que des sujets qui rencontrent des difficultés en source lorsque la parité est peu saillante élaborent une représentation dans laquelle ce concept est intégré de manière plus abstraite (Needham et Begg, 1991). Il est à noter que si chacune de ces deux hypothèses peut expliquer seule les résultats, elle ne sont pas exclusives. La généralisation peut parfois s'accompagner d'une bonne mémorisation des traits de surface ; Reeves et Weisberg, 1994, parlent alors de généralisation « conservative » (voir aussi Marmèche et Didierjean, 2001).

Dans l'expérience 3, nous avons cherché à départager les hypothèses H2 et H3. Pour cela, nous avons testé le degré de généralisation de la représentation du rôle de la parité élaborée par les sujets à l'issue de l'analyse de la source, en leur proposant une tâche de catégorisation. Après avoir essayé de résoudre une des deux versions du problème du dîner, les sujets devaient catégoriser sans les résoudre différentes variantes du problème de l'échiquier tronqué, selon leur proximité avec le problème du dîner. Pour construire les variantes du problème de l'échiquier utilisées dans cette tâche de catégorisation, nous avons manipulé certains traits de surface (les cases retirées étaient des coins ou non) et certains traits de structure du problème (les cases retirées étaient de même couleur, ou non). La Figure 14 présente un exemple des différents échiquiers utilisés dans les problèmes donnés aux sujets.

Si la difficulté de la source influence le transfert en ce qu'elle permet l'élaboration d'une connaissance où la notion de parité est élaborée de manière abstraite (H3), les sujets ayant résolu la version « difficile » du dîner devraient catégoriser davantage les problèmes selon leurs traits de structure (2 cases de même couleur retirées) que les sujets ayant résolu la version « facile ». Si la difficulté de la source influence le transfert en ce qu'elle favorise la mémorisation et/ou la récupération de la source (H2), les performances devraient être équivalentes pour les deux groupes. En effet, quel que soit le niveau de mémorisation de la source, séparer les problèmes dont les deux cases retirées sont de même couleur de ceux dont les cases retirées ne sont pas de même couleur nécessite d'avoir compris que dans ce type de problème, la parité est un élément clé.

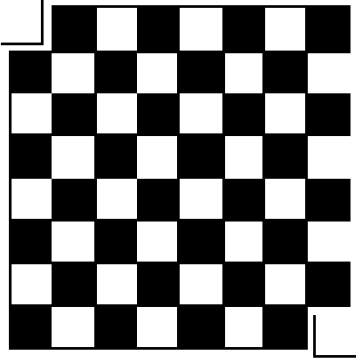
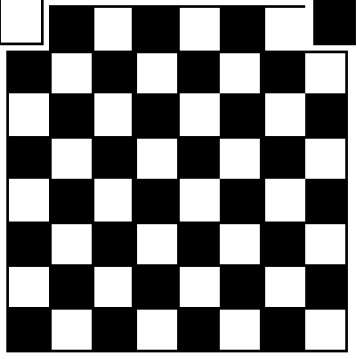
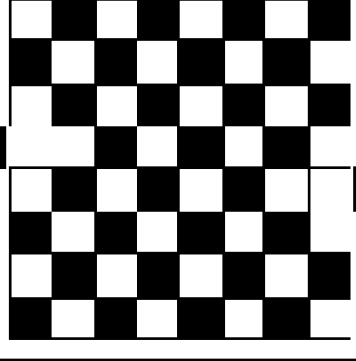
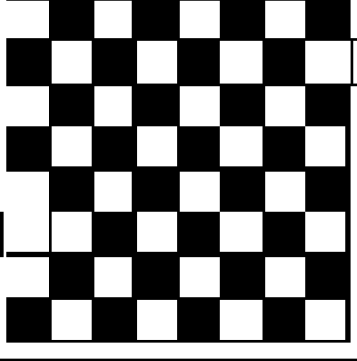
Traits de structures		
	identiques	différents
Eléments de surface proches		
Eléments de surface éloignés		

Figure 14 : Quelques exemples d'échiquiers utilisés pour la tâche de catégorisation

MÉTHODE

Participants

Les participants étaient 80 étudiants de première et deuxième année de psychologie de l'université Lumière (Lyon). Ils avaient un âge moyen de 22 ans et 3 mois (écart type 60 mois). 6 étudiants connaissaient déjà le problème de l'échiquier tronqué et ont été exclus lors du traitement des résultats (2 dans la condition facile et 4 dans la condition difficile).

Matériel

Dans la phase de résolution des problèmes sources, les versions facile et difficile (Figure 12) du problème du dîner ainsi que la solution (Figure 13) ont été présentées.

Pour la phase test, 8 problèmes ont été construits à partir de la version française du problème de l'échiquier : le problème lui-même et 7 variantes (Figure 14). Les variantes étaient construites en enlevant des cases soit de couleurs identiques soit de couleurs différentes et en modifiant la position des cases enlevées (cases dans les coins ou sur les bords).

Procédure

Les participants étaient testés par groupe de 15 sujets. Ils étaient affectés aléatoirement à l'une des deux conditions. Il leur était fourni le premier problème ainsi qu'un stylo et il leur était demandé de lire attentivement l'énoncé, de s'aider du graphique pour résoudre le problème et de ne pas hésiter à annoter la feuille qui leur était remise. Les sujets disposaient de 5 minutes pour tenter de résoudre le problème source. S'ils trouvaient la solution, on leur demandait de l'écrire sur une feuille qui leur était fournie. A l'issue des 5 minutes, les sujets recevaient une feuille comportant la solution du problème source et il leur était demandé de lire attentivement la solution, puis une fois que celle-ci leur paraissait bien comprise, de la réécrire au dos de la feuille avec leurs mots à eux.

Après cette phase, les sujets des deux groupes devaient catégoriser les huit versions du problème de l'échiquier en deux tas : ceux dont la méthode de résolution leur semblait proche du problème source et ceux dont la méthode de résolution leur paraissait éloignée. Un temps limité de 5 minutes leur était accordé pour lire les énoncés et classer les problèmes.

A l'issue de cette phase, l'expérimentateur demandait aux participants s'ils avaient déjà eu connaissance de l'un ou l'autre problème avant l'expérience.

RÉSULTATS

Performances aux problèmes sources

Comme dans les expériences précédentes, les solutions proposées par les sujets au problème du dîner ont été codées à partir des critères utilisés par Gick et McGarry (1992).

Les résultats sur les problèmes sources montrent que les sujets ayant eu la version « difficile » du problème du dîner ont moins produit la solution correcte que les sujets ayant eu la version « facile » (5.5% vs 21.6%), $G^2(1, N=74) = 3.799$, $p = .051$.

La réécriture de la solution par les sujets des deux groupes a également été codée, aucune différence n'est observée entre les sujets des deux groupes (94.4% en version difficile vs 97.4% en version facile), $G^2(1, N=74) = 0.406$, $p = .524$.

Catégorisation des problèmes

Les regroupements de problèmes proposés par les sujets ont été codés en mode binaire : la réponse est considérée comme juste lorsque l'ensemble des 4 problèmes ayant des

traits de structures similaires sont regroupés, toutes les autres réponses étant considérées comme fausses.

On observe un taux de réponses justes significativement supérieur pour le groupe ayant eu la version « difficile » du problème du dîner en source par rapport au groupe ayant eu la version « facile » du problème du dîner (55.5% vs 24.3%), $G^2(1, N=74) = 7.880$, $p < .01$.

La réussite à la tâche de catégorisation ne semble pas liée à la résolution correcte ou non du problème source (toutes conditions confondues 44.4% vs 38.5%), $G^2(1, N=74) = 0.003$, $p = .954$. Lorsque l'on observe les résultats en catégorisation des sujets qui ont échoué la résolution des problèmes sources, on trouve un résultat similaire à celui obtenu sur l'ensemble des sujets. Les sujets ayant eu la version « difficile » du problème du dîner réussissent beaucoup mieux la catégorisation des problèmes selon leurs traits de structure (55,9% vs 20% de réussite), $G^2(1, N=64) = 8.621$, $p < .01$.

DISCUSSION

Cette expérience montre que le problème source difficile augmente les performances des sujets dans une tâche de catégorisation : les sujets qui devaient résoudre la version difficile du problème source catégorisent mieux des problèmes isomorphes sur la base des traits de structure (la notion de parité) que les sujets qui ont résolu la version facile.

Ces résultats ne peuvent pas être expliqués seulement par une meilleure mémorisation du problème source (hypothèse 2). En effet, pour catégoriser suivant les traits de structure plutôt que suivant les traits de surface, les sujets du groupe difficile ont dû construire une représentation plus abstraite de la notion de parité.

Les résultats de cette expérience appuient donc l'hypothèse selon laquelle rendre peu saillant l'élément structural important dans la source joue un rôle dans le niveau d'abstraction de la représentation de la source.

3.2.4. Expérience 4 : quel rôle la solution du problème source joue-t-elle ?

Les résultats des expériences présentées précédemment montrent que la difficulté de la source joue un rôle dans le niveau d'abstraction de la représentation de la source. Pour essayer de comprendre ce rôle, deux hypothèses peuvent être proposées. Selon une première hypothèse, la difficulté de la source aurait une influence sur les processus mis en œuvre durant la lecture de la solution. Selon la seconde hypothèse, la différence entre les deux groupes tiendrait non pas aux processus mis en œuvre sur la solution, mais uniquement à la nature de la recherche réalisée durant la résolution du problème. Pour tester ces hypothèses, nous avons répliqué l'expérience 1 en omettant de présenter la solution à l'issue de la résolution du problème source. Si la différence tient aux processus mis en œuvre durant l'étude de la solution, en l'absence de la solution, la différence entre les groupes facile et difficile devrait disparaître.

MÉTHODE

79 étudiants (d'âge moyen 18 ans et 5 mois) en première année de licence MASS et SVT

de l'université Claude Bernard Lyon 1 ont participé à cette expérience. Aucun des sujets n'avait entendu parler avant l'expérience du problème de l'échiquier tronqué. Cette expérience se déroulait en groupe de 20 à 30 personnes (chacun des sujets résolvait seul les problèmes). Le matériel utilisé était en tout point identique aux expériences 1 et 2. Les sujets étaient affectés aléatoirement à l'une de deux conditions du problème du dîner. Les sujets disposaient de 5 minutes pour tenter de résoudre le problème source. S'ils trouvaient la solution, on leur demandait de l'écrire sur une feuille qui leur était également remise. A l'issue des 5 minutes, les sujets des deux groupes avaient 5 minutes pour résoudre le problème de l'échiquier. En leur remettant le problème, l'expérimentateur renouvelait les consignes données pour la source. Ensuite, l'expérimentateur demandait au sujet de rappeler par écrit le problème source. Puis le problème de l'échiquier tronqué était de nouveau présenté ; les consignes données insistaient cette fois sur la relation entre le problème source et le problème de l'échiquier. Enfin l'expérimentateur demandait si le participant avait déjà eu connaissance de l'un ou l'autre problème avant l'expérience.

RÉSULTATS

Performance au problème source

Contrairement aux autres expériences, l'analyse des taux de réussite du problème source ne montre pas de différence significative entre les sujets ayant eu la version « difficile » et les sujets ayant eu la version « facile » (5,3% vs 19,5%), mais seulement une tendance $\chi^2(1, N=79)=3.62, p=.057$.

Performance au problème cible

Contrairement aux expériences précédentes, on n'observe pas de différence entre les deux groupes (groupe facile :4,9% vs groupe difficile 0%), $\chi^2(1, N=79)=1.90, p=.168$. Dans cette condition, le taux de transfert pour les deux groupes est très inférieur au taux de transfert observé lorsque la solution est présente.

Rappel du problème source

L'analyse des réponses montre que 88,5% des participants ont rappelé correctement le problème source. On n'observe pas de différence entre les groupes ($\chi^2(1, N=79)=0.230, p=.634$).

Transfert indicé

L'analyse des performances en résolution du problème en situation de transfert indicé montre qu'il n'y a pas de différence entre les deux groupes ($\chi^2(1, N=77)=1.720, p=.189$). Le taux de transfert indicé est faible : le groupe facile obtient 18% de réussite en transfert indicé contre 7,9% de réussite pour le groupe difficile.

DISCUSSION

Dans cette expérience, nous avons étudié le rôle de la solution du problème source dans

en vertu de la loi du droit d'auteur.

l'abstraction du concept de parité. Selon une première hypothèse, la difficulté de la source influencerait sur les processus mis en œuvre durant la lecture de la solution. Selon une seconde hypothèse, la qualité de la généralisation serait uniquement liée à la nature de la recherche réalisée durant la résolution du problème. Pour tester ces hypothèses nous avons répliqué l'expérience 1 sans donner la solution.

Il est d'abord à noter que dans cette expérience, nous observons seulement une tendance à une différence entre les deux groupes pour la réussite au problème source. En outre, les performances sur le problème transfert sont beaucoup plus faibles que dans l'expérience 1 quelque soit la condition, et on n'observe pas de différence entre les groupes facile et difficile. Les différences de performances par rapport à l'expérience 1 ne peuvent pas s'expliquer par une difficulté de remémoration de la source (environ 90 % de rappel correct). Ces résultats laissent supposer que la lecture de la solution après avoir tenté de résoudre le problème difficile joue un rôle dans la généralisation. Cette expérience qui apporte un premier éclaircissement au rôle de la saillance des traits de surface nous amène à suggérer que la saillance des traits de structures pourrait avoir une influence sur les processus mis en jeu durant la lecture de la solution : les sujets du groupe difficile pourraient être plus sensibles au traits de structure lors de la lecture de la solution.

3.3. Discussion générale

L'objectif de ces expériences était de déterminer le rôle de la saillance des traits structuraux du problème source dans le raisonnement par analogie. Trois hypothèses non exclusives étaient proposées. Selon une première hypothèse (H1), réduire la saillance des éléments pertinents pour la résolution du problème favorise le transfert car cela augmente la probabilité que les sujets prennent conscience de l'existence d'un lien entre la source et la cible (par exemple en faisant des erreurs similaires dans les deux problèmes). Selon la seconde hypothèse (H2), réduire la saillance des éléments pertinents favorise une meilleure mémorisation de la source. Selon la troisième hypothèse (H3), réduire la saillance des éléments pertinents favorise le transfert spontané car les sujet construisent une représentation de la source dans laquelle l'élément central pour la résolution est encodé d'une manière plus abstraite (par exemple en incluant la contrainte « 2 éléments identiques manquent » plutôt que « deux femmes manquent » dans la représentation de la solution). L'expérience 1 a répliqué les résultats de Gick et McGarry et a montré que si le problème difficile affectait bien la compréhension du concept clé de la résolution, commettre une erreur sur ce concept clé ne suffisait pas pour réussir à résoudre le problème cible. L'expérience 2 répliquait les résultats de Gick et McGarry en situation de transfert indicé. L'expérience 3 a montré que la présentation d'un problème source difficile facilitait la catégorisation de problèmes isomorphes suivant leurs traits de structure. L'expérience 4 a montré que sans la présentation de la solution, l'effet de la saillance des traits de structure disparaissait.

Les résultats des expériences 1 et 2 permettent de rejeter la première hypothèse (H1) comme hypothèse explicative exclusive. Le rôle de la difficulté du problème source ne peut pas être expliqué seulement par son impact sur la prise de conscience d'un lien

entre source et cible. De plus, les erreurs relatives à l'élément clé de la résolution de la source ne semblent pas jouer un rôle central dans la réussite du problème transfert. Les résultats de l'expérience 3 ne peuvent être expliqués par une meilleure mémorisation de la source (H2) ; la catégorisation des problèmes suivant leurs traits de structure plutôt que leurs traits de surface nécessite d'avoir construit une représentation abstraite des éléments structuraux manipulés dans la source. De plus, dans la tâche de rappel de la source présentée après le transfert dans les expériences 1 et 2, les deux groupes avaient des performances de rappel identiques (ces résultats étaient similaires à ceux obtenus par Gick and McGarry, 1992 ; voir aussi Novick et Holyoak, 1991). Les résultats de ces 3 expériences appuient donc la troisième hypothèse (H3). Réduire la saillance des éléments pertinents pour la résolution de la source améliore le transfert vers le problème cible car les sujets construisent une représentation plus abstraite de la solution du problème source.

Même si ces résultats mériteraient d'être reproduits avec des problèmes différents, cette série d'expérience apporte des arguments forts pour étayer l'hypothèse selon laquelle modifier la saillance des traits de structure influe sur la mise en œuvre de processus de généralisation pouvant ainsi aboutir à l'abstraction de la représentation de la source. Toutefois, ces expériences ne donnent pas d'indication sur le type de processus mis en jeu et le moment où ce processus est mis en jeu. Les résultats de l'expérience 4 laissent supposer que la saillance des traits de structures a une influence sur les processus mis en jeu durant la lecture de la solution. Cette expérience ne suffit évidemment pas à comprendre le rôle de la saillance des traits de structure sur les processus en jeu pendant la résolution. On peut simplement faire l'hypothèse que réduire la saillance d'un trait de structure important peut, durant la lecture de la solution, conduire le sujet à s'interroger sur le rôle de cet élément et ainsi mettre en œuvre des processus explicatifs afin de généraliser.

Rappelons que d'autres études ont montré que de petits changements peuvent conduire à une généralisation à travers des processus explicatifs. Ainsi Catrambone (1995, 1996) montre que l'ajout de « labels » à la solution du problème favorise la généralisation même si ceux-ci sont peu informatifs. Les auteurs expliquent que l'ajout d'étiquettes conduit les participants à s'interroger sur leur sens et leur positionnement et ainsi à mettre en œuvre des processus explicatifs sur ces exemples. De la même façon, réduire la saillance des traits pertinents pour la résolution pourrait attirer l'attention sur le rôle de la parité lors de la lecture de la solution. Ainsi, on peut suggérer que rendre peu saillants les éléments « clés » des exemples conduirait à davantage de généralisation en ce que les apprenants s'interrogeraient ensuite davantage sur le rôle de ces éléments dans la résolution, construisant ainsi une représentation plus abstraite de la notion importante pour la résolution.

3.4. Bilan

Dans ce chapitre, nous avons cherché à vérifier que certains facteurs peuvent faciliter la mise en œuvre de processus de généralisation en étudiant l'effet de la saillance des traits de structure sur l'apprentissage (Gick et McGarry, 1992). Nous avons conduit quatre

expériences pour tester différentes hypothèses qui pourraient expliquer l'effet de ce facteur. Les résultats présentés ici répliquent les résultats obtenus par Gick et McGarry (1992) et montrent qu'étudier un problème « difficile » (dans lequel les éléments clé de la solution sont rendus peu saillants) facilite d'avantage la résolution d'un problème cible qu'un problème facile (dans lequel les traits de structure sont saillants). Ils montrent également que rendre le concept central pour la résolution peu saillant conduit les sujets à construire une connaissance plus générale, ce qui facilite ensuite la résolution du problème cible. Certains facteurs relatifs au mode de présentation des exemples facilitent donc effectivement la mise en œuvre de processus de généralisation.

Chapitre 4 : Etude des effets conjugués de la tâche à réaliser et de la similarité entre problèmes sur les processus de généralisation

La revue de littérature présentée dans le chapitre 2 indique que des facteurs de différentes natures tels que les activités réalisées sur les problèmes (auto-explications, comparaison, adaptation), la manière de présenter les problèmes, ou leur degré de similarité, semblent influencer la mise en œuvre des différents processus de généralisation. Ces différents facteurs ne sont pas indépendants les uns des autres. L'activité réalisée sur les problèmes semble avoir une influence différente sur la généralisation suivant la similarité entre les problèmes et leur mode de présentation. Est-il possible de manipuler ces différents facteurs pour déclencher des processus d'apprentissage ?

Notre objectif est ici de tester les conditions de déclenchement des différents processus en prenant en compte les interactions éventuelles entre la tâche proposée et les similarités entre problèmes.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord deux études qui portent sur les interactions entre mode de présentation et similarité entre problèmes et sur les interactions entre la tâche à réaliser sur les problèmes et leur mode de présentation. Ensuite, nous décrirons l'expérience que nous avons réalisée afin d'étudier les effets de la tâche réalisée et de la similarité entre problèmes sur le déclenchement des processus de généralisation.

Ross et Kilbane (1997) réalisent une recherche qui vise à étudier les effets conjugués de deux facteurs impliqués dans l'apprentissage à partir d'exemples : le format de présentation (intégration ou non du principe théorique) et la similarité entre problèmes. Cette expérience montre que le degré de similitude entre problème source et problème cible interagit avec l'intégration ou non du principe théorique dans l'exemple. Dans cette étude, les chercheurs font varier le degré de similitude entre l'exemple et le problème à résoudre, et la manière dont le principe théorique est associé à l'exemple : soit le principe théorique est décrit et accompagné d'un exemple illustratif (énoncé et corrigé), soit il est incorporé à l'exemple sous la forme d'une explication très détaillée du passage de

l'énoncé à la solution (Figure 15). Les résultats obtenus mettent en évidence un effet d'interaction entre intégration du principe théorique et similitude entre exemple et problème. Lorsque le principe est intégré à l'exemple, le problème est mieux résolu s'il a des traits de surface proches de l'exemple. A l'inverse, lorsque le principe est présenté à côté de l'exemple, le problème est mieux résolu si ses traits de surface sont différents de l'exemple.

Les chevaliers du comté de Nottingham prenaient part chaque année à un tournoi de joutes. Cette année là, pour participer à la joute, chacun des 8 chevaliers devait monter l'un des 11 chevaux du prince. Les chevaliers choisirent aléatoirement un cheval, en fonction du poids du chevalier en armure (le plus lourd choisit en premier). Quelle était la probabilité que le plus lourd chevalier ait monté le plus grand cheval, le second chevalier le plus lourd ait monté le second plus grand cheval et le troisième plus lourd chevalier ait monté le troisième plus grand cheval ?

Pour résoudre le problème répondez aux questions suivantes :

Les objets choisis sont les chevaux. Combien de chevaux sont-ils disponibles pour être choisis par les chevaliers ? Ce Nombre est n.

La question demande quelle est la probabilité que ces chevaux soient choisis dans un ordre particulier. Quel est le nombre de chevaux choisis qui nous intéressent ? Ce nombre est r.

Maintenant, vous devez considérer le nombre de chevaux disponibles lorsque chaque chevalier fait son choix.

Le premier chevalier choisit parmi 11 chevaux.

Le second choisit parmi 10 chevaux, c'est-à-dire les 11 chevaux du prince moins le cheval choisi par le premier chevalier.

Le troisième choisit parmi 9 chevaux (11 moins 2 choisis par les deux premiers chevaliers).

Pour trouver le nombre des différents arrangements de chevaux que les chevaliers peuvent choisir, multiplie le nombre n à (n-1), etc. jusqu'à avoir r termes. Dans cet exemple,

$$(n)(n-1)(n-2) \dots (n-r+1) = 11 \times 10 \times 9$$

Si ceci est le nombre d'arrangement de r chevaux qui peuvent être choisis, la probabilité que r chevaux seront choisis dans un ordre particulier est de 1/r par ce nombre :

$$1/(11 \times 10 \times 9)$$

C'est la probabilité que le plus lourd chevalier monte le plus grand cheval, le second plus lourd chevalier monte le second plus grand cheval, et le troisième plus lourd chevalier monte le troisième plus grand cheval.

Figure 15 : exemple de problème d'arrangement dans lequel le principe théorique est incorporé à l'exemple (Ross & Kilbane, 1997, traduit en français)

Bernardo (2001) s'inspire de l'étude de Ross et Kilbane (1997) pour étudier l'interaction entre la tâche réalisée par les apprenants et l'intégration ou non du principe théorique. L'expérience qu'il réalise est composée d'une phase d'apprentissage dans laquelle deux tâches différentes sont proposées puis d'une phase de test. Dans la première phase, la moitié des participants compare deux problèmes résolus tandis que l'autre moitié étudie un problème résolu puis construit un nouveau problème. Cette tâche consiste à inventer un énoncé de problème pouvant se résoudre de la même manière que l'exemple puis à essayer de le résoudre. Comme dans l'expérience de Ross et Kilbane (1997), deux types de problèmes résolus sont proposés : soit le principe théorique est décrit et accompagné d'un exemple illustratif (énoncé et corrigé), soit il est incorporé à l'exemple sous la forme d'une explication spécifique du passage de l'énoncé à la solution. Ensuite, dans une phase de test, les participants doivent résoudre plusieurs problèmes proches des problèmes résolus. Les résultats de cette expérience mettent en évidence un effet d'interaction entre la présentation du principe et la tâche réalisée par les participants. Lorsque le principe est incorporé, la construction de problème conduit à de meilleures

performances que la comparaison de problèmes. A l'inverse, lorsque le principe accompagne l'exemple, les performances sont meilleures lorsque les problèmes sont comparés plutôt que lorsqu'un problème est construit.

Ces différentes études mettent donc en évidence des effets d'interaction entre format de présentation et similarité entre exemples ainsi qu'entre format de présentation et tâche réalisée par l'apprenant. Un troisième type d'effet à étudier concerne l'interaction entre similarités entre problèmes et tâche à réaliser.

Dans cette étude, nous nous intéressons donc à l'interaction entre tâche et similarité entre exemples. D'après la revue de littérature (cf. chapitre 2), lorsque deux exemples isomorphes sont fournis, si les apprenants les comparent il semble préférable que leurs traits de surface soient éloignés (Gick et Holyoak, 1983 ; Quillici et Mayer, 1996), tandis que si les apprenants tentent d'adapter le premier sur le deuxième, il semble préférable que leurs traits de surface soient proches (Ross, 1989 ; Ross et Kennedy, 1990). Cependant, ces différents effets ont été montrés dans des expériences indépendantes, l'interaction entre ces deux variables n'a, à notre connaissance, jamais été étudiée.

Notre objectif ici est de mettre en évidence une interaction entre tâche et similarité entre exemples, ceci afin d'identifier les conditions dans lesquelles les processus de détection de similitudes et d'adaptation sont mis en œuvre de façon efficace. Nous supposons que l'interaction entre la tâche réalisée par les apprenants et la similitude entre problèmes peut conduire à la mise en œuvre de différents processus de généralisation de connaissances, et ainsi favoriser l'efficacité des processus mis en œuvre.

4.1. Principe de l'expérience

L'expérience que nous avons réalisée se déroule en deux étapes, une phase d'apprentissage et une phase de test. Durant la phase d'apprentissage, deux groupes de participants produisaient des tâches différentes (adaptation ou comparaison) sur plusieurs paires constituées de problèmes similaires ou dissimilaires qui illustraient deux principes théoriques de probabilités (un principe était illustré par des paires de problèmes ayant un habillage similaires tandis que l'autre était illustré par des paires de problèmes ayant un habillage dissimilaire). À l'issue de cette première phase, une phase de test consistait à résoudre différents problèmes afin de mesurer le niveau de généralisation des connaissances acquises.

Notre hypothèse est que si les problèmes sont éloignés, la tâche de comparaison des exemples devrait favoriser la mise en œuvre d'un processus de détection de similitudes (Cummins, 1992), tandis que si les problèmes sont proches, la tâche de résolution de problème par analogie devrait favoriser la mise en œuvre d'un processus d'adaptation (Ross et Kennedy, 1990). Les meilleures performances devraient être obtenues lorsque les participants comparent des problèmes dissimilaires ou adaptent un problème similaire.

4.2. Méthode

4.2.1. Participants

85 élèves (âge moyen 18 ans, écart-type 18 mois) en classe de terminale scientifique au lycée de Vaulx en Velin et au Lycée St Bruno de Lyon ont participé à cette expérience. Tous les participants avaient suivi des cours présentant les bases du calcul de probabilité.

4.2.2. Matériel

Le matériel de cette expérience était constitué de problèmes de calcul de probabilités traduits et adaptés des problèmes proposés par Ross (1989) (Figure 16). Ces problèmes illustraient deux principes théoriques (combinaison et arrangement).

PHASE D'APPRENTISSAGE

Dans la phase d'apprentissage, huit problèmes de calcul de probabilité étaient présentés : quatre problèmes de combinaison et quatre problèmes d'arrangement. Ces problèmes étaient présentés par paire sur deux feuilles consécutives. La similarité de surface des problèmes de chaque paire était manipulée (cf. Tableau 3) en manipulant la nature des entités présentes dans l'énoncé (hommes / animaux/ objets). Le second problème de la paire avait soit un habillage similaire, soit un habillage dissimilaire au premier problème de la paire (Figure 16). Au cours de la phase d'apprentissage, la moitié des participants voyait deux paires de problèmes de combinaison ayant un habillage similaire (représentés dans le tableau par AA') puis deux paires de problèmes d'arrangement ayant un habillage dissimilaire (représentés dans le tableau par CD') présentés successivement dans un livret (livret 1) alors que l'autre moitié des participants voyait deux paires de problèmes de combinaison ayant un habillage dissimilaire (AB') puis deux paires de problèmes d'arrangement ayant un habillage similaire (CC') (livret 2). Les deux séquences de problèmes présentés sont schématisées dans le Tableau 3.

	Combinaisons		Arrangements	
	paire 1	paire 2	paire 1	paire 2
livret 1	AA'	BB'	CD'	DC'
livret 2	AB'	BA'	CC'	DD'

Tableau 3 : Caractéristiques schématisées des problèmes présentés dans la phase d'apprentissage

Les chevaliers du comté de Nottingham prenaient part chaque année à un tournoi de joutes. Cette année là, pour participer à la joute, chacun des 3 chevaliers devait monter l'un des 11 chevaux du prince. Les chevaliers choisirent aléatoirement un cheval, en fonction du poids du chevalier en armure (le plus lourd choisit en premier). Quelle était la probabilité que le plus lourd chevalier ait monté le plus grand cheval, le second chevalier le plus lourd ait monté le second plus grand cheval et le troisième plus lourd chevalier ait monté le troisième plus grand cheval ?

Les objets choisis sont les chevaux, 11 chevaux peuvent être choisis par les chevaliers. Parmi ces 11 chevaux, 3 sont effectivement choisis.

Le premier chevalier choisit parmi 11 chevaux, le second choisit parmi 10 chevaux, et le troisième choisit parmi 9 chevaux.

Le nombre de triplets différents qui peuvent être formés par les trois chevaux choisis est égal à :

$$11 \times 10 \times 9$$

Un seul triplet correspond au choix du plus grand cheval d'abord, du second plus grand cheval ensuite et enfin du troisième plus grand cheval. La probabilité que ce choix se réalise effectivement est donc égal à :

$$1/(11 \times 10 \times 9)$$

C'est la probabilité que le plus lourd chevalier monte le plus grand cheval, le second plus lourd chevalier monte le second plus grand cheval, et le troisième plus lourd chevalier monte le troisième plus grand cheval

Figure 16 : Problème résolu présenté dans l'expérience, traduction d'un problème présenté par Ross (1989)

Problème similaire

Les paysans du comté de Nottingham allaient chaque année au grand marché aux bestiaux pour y acheter des poules. Cette année là, à cause d'une épidémie, 10 poules seulement étaient à vendre et 11 paysans étaient intéressés. Pour limiter les disputes, les paysans devaient choisir aléatoirement une poule, le plus grand paysan choisissant en premier. Quelle était la probabilité que le plus grand des paysans ait eu la poule la plus grasse, le second plus grand paysan ait eu la seconde poule la plus grasse, le troisième plus grand paysan ait eu la troisième poule la plus grasse, et le quatrième plus grand paysan ait eu la quatrième poule la plus grasse ?

Problème dissimilaire

Le service des fournitures d'IBM doit s'assurer que les scientifiques de l'entreprise disposent d'ordinateurs. Aujourd'hui il y a 14 ordinateurs disponibles et 9 scientifiques qui font la demande d'un ordinateur. Les scientifiques choisissent aléatoirement leur ordinateur, mais ils le font dans un ordre alphabétique. Quelle est la probabilité que les quatre premiers scientifiques par ordre alphabétique reçoivent respectivement le numéro de série le plus bas, le second numéro de série le plus bas, le troisième numéro de série le plus bas et le quatrième numéro de série le plus bas ?

Figure 17 : Problèmes ayant un habillage similaire ou dissimilaire du problème présenté dans la figure précédente

Problème initial : Le comité d'entreprise de la Société SNDF organise l'arbre de Noël de la société. La société emploie 36 personnes. 29 cadeaux sont disposés au pied de l'arbre de Noël. Les employés choisissent aléatoirement leur cadeau, l'employé qui a le plus d'ancienneté choisissant le premier. Quelle est la probabilité que le plus ancien employé reçoive le cadeau le plus petit, que le second plus ancien employé reçoive le second cadeau le plus petit, le troisième plus ancien employé reçoive le troisième cadeau le plus petit, et le quatrième plus ancien employé reçoive le quatrième cadeau le plus petit ?

Solution : $1/(29 \times 28 \times 27 \times 26)$

Problème inversé : Le comité d'entreprise de la Société SNDF organise l'arbre de Noël de la société. La société emploie 36 personnes. 29 cadeaux sont disposés au pied de l'arbre de Noël. Les cadeaux sont attribués dans l'ordre suivant leur taille (le plus gros cadeau est attribué en premier etc...). Pour chaque cadeau, l'employé qui reçoit le cadeau est choisi aléatoirement. Quelle est la probabilité que le plus ancien employé reçoive le cadeau le plus gros, que le second plus ancien employé reçoive le second plus gros cadeau, le troisième plus ancien employé reçoive le troisième plus gros cadeau, et le quatrième plus ancien employé reçoive le quatrième cadeau le plus gros ?

Solution : $1/(36 \times 35 \times 34 \times 33)$

Figure 18 : Exemples de problèmes à correspondance inversée

PHASE DE TEST

Dans la phase test, quatre problèmes à résoudre (deux par principe théorique) étaient présentés. Ceux-ci étaient construits de façon à ce que le rôle des objets soit inversé par rapport aux problèmes de la phase d'apprentissage (Ross, 1989). En effet, dans la phase d'apprentissage, les problèmes présentés mettaient en scène des personnes qui choisissaient parmi un ensemble d'objets ou d'animaux. A l'inverse, dans la phase de test, les problèmes décrivaient des personnes à qui étaient attribués des objets ou des animaux. Les problèmes présentés Figure 18 illustrent cette inversion. Dans le problème initial, des employés choisissaient parmi un ensemble de 29 cadeaux. Dans ce problème, la question portait sur le choix d'un sous-ensemble de cadeaux ($r = 4$) parmi l'ensemble des cadeaux disponibles ($n = 29$). Dans le problème inversé, des cadeaux étaient attribués aux employés, la question portait cette fois sur le choix d'un sous-ensemble d'employés ($r = 4$) parmi l'ensemble des employés présents ($n = 36$). Le second problème semble très proche du premier mais la correspondance entre les objets et leur fonction est inversée.

Nous avons choisi ce test car les recherches de Ross ont montré que si les sujets qui résolvent un problème par analogie préfèrent spontanément mettre des entités similaires (identiques ou de même catégorie) dans des rôles similaires (object mapping view, Ross, 1987 ; 1989), la nature des entités (objet / animal / personne) devrait avoir moins d'influence s'ils ont acquis une connaissance abstraite (Ross et Kennedy, 1990 ; Ross et Kilbane, 1997).

4.2.3. Procédure

Cette expérience avait lieu dans les lycées et se déroulait par classe entière (chacun des participants résolvait seul les problèmes) pendant les heures de cours. Elle se

décomposait en deux phases, une phase d'apprentissage et une phase de test. Dans la première phase, un livret contenant huit problèmes (livret A ou B) était distribué aux participants. Ceux-ci voyaient ainsi deux paires de problèmes similaires et deux paires de problèmes dissimilaires. Il leur était demandé de lire attentivement chaque paire de problèmes et de réaliser la tâche demandée sur ces problèmes. Les participants étaient affectés aléatoirement à l'une des deux conditions : adaptation ou comparaison. Dans chaque condition, la moitié des participants étudiait le livret A et l'autre moitié étudiait le livret B.

- Dans la condition « adaptation », pour chaque paire de problèmes, les participants devaient lire attentivement le premier problème de chaque paire et sa solution avant de résoudre le second problème en s'aidant du premier.
- Dans la condition « comparaison », chaque paire de problèmes résolus était suivie d'une feuille rappelant au participant qu'il devait comparer ces deux problèmes en identifiant les éléments pertinents pour la résolution partagés ou non par ces problèmes.

Cette phase d'apprentissage, d'une durée de 20 minutes, était suivie d'une phase de test, d'une durée de 10 minutes, qui consistait à résoudre quatre problèmes (deux problèmes par principe).

4.3. Résultats

En raison de difficultés rencontrées lors de l'expérience dans l'une des classes, nous avons exclu de l'analyse les protocoles des élèves qui n'avaient pas réalisé la tâche demandée dans l'apprentissage. Nous avons donc analysé les protocoles de 67 participants (34 dans la condition comparaison, 33 dans la condition adaptation).

4.3.1. Phase d'apprentissage

Une analyse des protocoles du groupe « adaptation » montre que les problèmes à résoudre dans la phase d'apprentissage ont été correctement résolus (80% de bonnes réponses). L'analyse des protocoles du groupe « comparaison » montre que les commentaires produits sont souvent superficiels : « c'est la même chose ». Le plus souvent, les participants identifient une structure commune aux deux problèmes à comparer mais n'en font pas de description.

4.3.2. Phase de test

CODAGE DES RÉPONSES

Nous avons codé les réponses suivant le codage utilisé par Ross (1989 ; Ross et Kilbane, 1997). Chacun des 67 protocoles de réponses de la phase de test a été codé de deux manières. D'une part, nous avons codé la justesse des réponses en attribuant un score de 1 si la réponse était correcte et un score de 0 si la réponse était incorrecte. D'autre

part, nous avons codé les erreurs d'inversion. Nous considérons que ce type d'erreur est un bon indicateur de l'acquisition d'une connaissance générale ; en effet si les apprenants ont construit une connaissance générale, ils ne devraient pas être perturbés par l'inversion des rôles dans les énoncés (cf. Ross, 1987 ; 1989 ; Ross et Kilbane, 1997). Nous avons jugé qu'un participant commettait une erreur d'inversion s'il faisait une erreur dans le choix de l'ensemble de départ (s'il considérait que le choix était fait parmi un ensemble d'objets plutôt que parmi un ensemble de personnes, cf. Figure 18). Nous avons attribué un score de 0 si aucune inversion n'était commise, un score de 1 si une erreur d'inversion était présente et un score de 0,5 lorsque le calcul prenait en compte les bonnes valeurs, mais que la phrase réponse n'était pas cohérente avec le calcul.

D'une manière générale, nous observons un taux de réussite assez faible (20 %) associé à un très fort taux d'erreur d'inversion (76,5%) et ceci quelle que soit la condition.

ANALYSE DES RÉPONSES CORRECTES

Pour mesurer les effets conjugués des variables tâche et similarité, nous avons réalisé une analyse de variance sur les réponses correctes (Tableau 4) avec la variable similarité (similaire/ dissimilaire) comme variable intra-sujet et la variable tâche (adapter / comparer) comme une variable inter-sujets. Cette analyse n'a pas mis en évidence d'effet significatif de la tâche ($F(1,65) < 1$; $p = .62$), de la similarité ($F(1,65) < 1$; $p = .60$) ou d'effet d'interaction entre ces deux variables ($F(1,65) = 1.6$; $p = .20$).

Tableau 4: Pourcentages de réponses correctes dans chaque condition

problèmes	similaires	dissimilaires
Adaptation	12,9%	21,9%
comparaison	22,6%	18,8%

ANALYSE DES ERREURS D'INVERSION

Nous avons réalisé la même analyse sur les erreurs d'inversion (Tableau 5). Celle-ci n'a pas davantage mis en évidence d'effet significatif de la tâche ($F(1,65) < 1$; $p = .33$), d'effet de la similarité ($F(1,65) < 1$; $p = .66$) ou d'effet d'interaction entre ces variables ($F(1,65) = 1.03$; $p = .32$).

Tableau 5: Pourcentages d'erreurs d'inversion dans chaque condition

problèmes	similaires	dissimilaires
adaptation	85%	77%
comparaison	71%	75%

4.4. Discussion

Selon nos hypothèses, comparer des problèmes dissimilaires devrait conduire à la mise en œuvre d'un processus de détection de similitudes tandis qu'adapter des problèmes

similaires devrait conduire à une généralisation par adaptation. Nous nous attendions donc à ce que ces deux conditions soient associées à une meilleure résolution des problèmes tests ; mais les résultats obtenus dans cette expérience ne valident pas nos hypothèses. On n'observe pas de différences significatives entre les différentes conditions : le taux de réussite des problèmes tests est faible quelles soient les conditions et un grand nombre d'erreurs d'inversion ont été commises (76,5%).

Cette étude ne réplique donc pas les résultats obtenus dans les recherches menées précédemment. Ainsi, contrairement à ce que montre l'étude de Cummins (1992), la tâche de comparaison que nous avons proposé n'a pas semblé conduire à un traitement de haut niveau sur les problèmes. Si les participants ont noté que les problèmes avaient une structure identique, ils n'ont pas su décrire les points communs aux deux problèmes et identifier cette structure. Cependant, une différence entre notre étude et celle de Cummins (1992) réside dans la manière de demander aux participants de comparer : contrairement à nous, cette auteur pose des questions incitant à comparer des points précis des exemples.

Par ailleurs, contrairement aux études de Ross (Ross et Kennedy, 1990), lorsque les participants adaptent la solution du problème résolu pour résoudre un nouveau problème, les performances aux problèmes tests ne sont pas meilleures si les problèmes ont un habillage similaire. Si le matériel que nous avons utilisé était adapté des études de Ross, la procédure que nous avons proposé était différente ; ceci pourrait expliquer l'écart entre les résultats de ces deux études. En effet, dans les expériences de Ross (Ross, 1989 ; Ross et Kennedy, 1990 ; Ross et Kilbane, 1997), la phase d'apprentissage consistait à présenter un seul problème par principe. Un problème caractéristique de chaque principe était ensuite donné à résoudre. Durant la résolution, les participants ne pouvaient pas consulter les exemples présentés auparavant. La généralisation par adaptation observée lors de la résolution de problèmes tests dans une seconde phase (Ross et Kennedy (1990) a donc été mise en évidence dans une situation où les participants devaient se remémorer l'exemple avant de l'adapter. Dans notre expérience, dans la condition adaptation, les apprenants étudiaient un exemple puis résolvaient immédiatement le problème par adaptation en ayant la possibilité de consulter l'exemple (dans la phase d'apprentissage, les participants voyaient quatre problèmes par principe). Il est possible que lorsque le participant a la possibilité de consulter le problème source pour l'adapter, il adapte le problème source « terme à terme » sans avoir besoin de construire une connaissance plus générale. Se remémorer le problème source pourrait être une condition nécessaire à la généralisation par adaptation.

Une autre explication à ces résultats peut également être avancée. En effet, d'après l'étude réalisée par Didierjean (2003), une généralisation par adaptation n'aurait lieu que si l'apprenant met activement en œuvre un processus de généralisation. Dans cette étude, les participants construisent une connaissance générale qui leur permet de résoudre des problèmes dont les traits de surface sont dissimilaires uniquement si la consigne indique que les problèmes à résoudre sont des problèmes d'entraînement. Dans notre expérience, nous n'avons pas précisé que les problèmes à résoudre dans la première phase étaient des problèmes d'entraînement. Il est donc possible que l'absence de généralisation soit due au fait que les apprenants n'aient pas mis en œuvre de manière

délibérée un processus de généralisation.

Enfin, il est possible que la variation du degré de similarité soit trop faible pour observer un véritable effet de ce facteur. En effet, Dans l'étude de Quillici et Mayer (1996), qui met en évidence l'intérêt de présenter des problèmes dissimilaires, les problèmes illustrant le même principe sont très différents les uns des autres : les informations contextuelles sont plus ou moins développées, et les informations pertinentes apparaissent sous des formes différentes (la structure syntaxique des énoncés et les mots utilisés sont différents). Se pose donc la question du choix des similarités de surface à faire varier.

Dans les énoncés que nous avons présentés, nous avons fait varier la similarité de surface en manipulant la nature des entités présentes dans l'énoncé. En effet, les études de Ross (Ross, 1987 ; 1989) montrent que les sujets utilisent spontanément ce trait lorsqu'ils résolvent un problème par analogie. Or, Bassok, Wu et Olseth (1995) montrent qu'un autre type de similarité orientent davantage le transfert analogique. Ils montrent que les sujets font des inférences sur les relations entre les entités présentes dans les énoncés en fonction de leurs connaissances sémantiques associées à la situation décrite. Ainsi, face aux problèmes d'arrangement que nous avons présentés, les sujets peuvent interpréter les relations entre entités comme « des receveurs reçoivent des artefacts / des animaux ». Si cette interprétation peut faciliter la résolution de certains problèmes d'arrangement, elle peut aussi nuire à la résolution d'autres problèmes de ce type dans lesquels les relations sont inversée ou dans lesquels un objet est assigné à un autre objet.

Nous aurions donc sans doute obtenu des résultats différents si nous avions fait varier non seulement le type d'entité mais aussi le type de relation entre les entités présentes dans l'énoncé.

Plus généralement, il semble que l'identification des degrés de similarité à faire varier passe par une meilleure compréhension des similarités et des indices qui orientent la résolution de l'énoncé.

4.5. Bilan

Dans cette étude, nous avons étudié les effets conjugués de la tâche à réaliser sur des problèmes et de la similarité entre ces problèmes sur le déclenchement des processus de généralisation. Dans l'expérience réalisée, les participants devaient adapter ou comparer des problèmes dont la similarité variait avant de résoudre des problèmes tests. Les performances obtenues aux problèmes tests étaient assez faibles quelques que soient les conditions durant la première phase. Aussi cette expérience n'a pas permis de démontrer que les variables manipulées facilitent l'acquisition de connaissances générales. Nous ne pouvons donc pas conclure à un effet des variables manipulées sur le déclenchement des processus de généralisation. Nous n'avons pas davantage mis en évidence d'interaction entre la tâche à réaliser sur les problèmes et la similarité entre problèmes. Néanmoins, nous avons soulevé différentes questions :

- la possibilité de consulter l'exemple lors de la résolution d'un nouveau problème a-t-elle une influence sur la généralisation par adaptation et quelle est cette influence ? 1.
- est-il nécessaire de se remémorer le problème source pour qu'une généralisation par adaptation soit mise en œuvre ? 2.
- la généralisation par adaptation doit-elle être mise en œuvre volontairement par l'apprenant ? 3.
- quelles sont les similarités de surface à faire varier pour influencer sur la mise en œuvre de processus de détection de similitude et sur la généralisation par adaptation ? 4.

Chapitre 5 : Discussion de la première partie

5.1. Résumé

Comment faciliter l'apprentissage à partir d'exemples ? De nombreux facteurs ayant des effets positifs sur l'apprentissage à partir d'exemples ont été identifiés. Certaines activités réalisées sur les problèmes et certains modes de présentation semblent plus favorables que d'autres.

Ainsi, si la résolution de problèmes favorise l'apprentissage lorsque les sujets ont déjà des connaissances préalables, l'analyse de problèmes résolus semble favoriser davantage l'apprentissage lorsqu'ils sont plus novices (Cooper et Sweller, 1987 ; Ward et Sweller, 1990 ; Paas et Van Mërrienboer, 1994). L'analyse de ces exemples est d'autant plus efficace si les sujets élaborent des auto-explications sur les exemples (Chi et al., 1989 ; Renkl, 1997, Bielaczyc, Pirolli et Brown, 1995 ; Neuman et Schwarz, 1998). Par ailleurs, la structuration du matériel (Gick et McGarry, 1992 ; Catrambone, 1995 ; 1996 ; 1998) tout comme l'habillage des problèmes présentés successivement peuvent influencer considérablement l'apprentissage. Si les études qui mettent en évidence ces effets présentent un grand intérêt d'un point de vu appliqué, elles avancent parfois des résultats qui semblent contradictoires et n'identifient pas toujours clairement les mécanismes cognitifs responsables de ces effets.

Une théorie explicative est toutefois avancée par Sweller et al.. Celui-ci interprète l'effet de certains facteurs en terme de coût cognitif. Certaines conditions imposeraient un coût cognitif trop important qui limiterait les ressources disponibles pour construire des connaissances. Une première manière de faciliter l'apprentissage consiste alors à réduire le coût cognitif imposé par la tâche et le matériel, afin d'augmenter les ressources disponibles pour construire des connaissances. Cependant, le fait de disposer des ressources nécessaires à la construction de connaissances abstraites ne garantit pas pour autant que le sujet les utilise dans ce but.

De notre point de vue, pour identifier les conditions qui facilitent l'apprentissage à

partir d'exemples il est nécessaire de prendre en compte les processus de généralisation de connaissances et d'identifier les conditions qui favorisent la mise en œuvre de ces processus. Plus particulièrement, nous supposons que l'apprentissage à partir d'exemples peut être amélioré en déclenchant la mise en œuvre des processus de généralisation à travers la manipulation de certains facteurs (structuration du problème, similarité entre problèmes, activités sur les problèmes).

Suivant cette approche, nous avons d'abord procédé à une revue de littérature afin d'identifier différents facteurs qui semblent avoir un effet sur la mise en œuvre de processus de généralisation.

Nous avons ensuite réalisé deux études. La première étude avait pour but de montrer que le mode de présentation des exemples (et plus particulièrement la saillance des éléments pertinents pour la résolution) joue effectivement un rôle dans la généralisation de connaissances. La seconde étude avait pour objectif de montrer qu'il est possible de déclencher les processus de généralisation en manipulant différents facteurs identifiés dans la littérature.

La première étude portait sur le rôle sur la généralisation de connaissances de la saillance de l'élément important pour la résolution. Dans cette étude, nous nous sommes appuyés sur une recherche réalisée par Gick et McGarry (1992) qui montre que rendre peu saillants les traits de structure d'un problème source favorise la résolution d'un problème isomorphe. D'après ces auteurs, lorsque l'élément important pour la résolution est peu saillant, les sujets commettraient plus d'erreurs, ce qui faciliterait ensuite la prise de conscience du lien entre la source et le problème cible. A travers 4 expériences, nous avons montré que cette hypothèse ne suffit pas à expliquer l'effet mis en évidence par Gick et McGarry. Nos résultats montrent que rendre peu saillants les éléments clé pour la résolution facilite la généralisation de connaissances. En effet, après avoir tenté de résoudre un problème source dont l'élément clé est peu saillant, les sujets construisent une représentation plus abstraite de ce concept central pour la résolution, ce qui augmente ensuite la réussite d'un problème isomorphe. Notre étude montre donc qu'une modification de la présentation d'un problème source peut conduire à construire une représentation plus abstraite de la solution source. Néanmoins, elle ne nous informe pas sur les processus mis en jeu. On peut avancer l'hypothèse, d'une mise en œuvre d'un processus explicatif lors de la lecture de la solution. Cette hypothèse reste à vérifier.

Dans une seconde étude, nous avons cherché à mieux identifier les conditions permettant de déclencher les processus de généralisation par détection de similitudes et par adaptation. D'après les données de la littérature, le processus de détection de similitude serait plus facilement mis en œuvre lorsqu'une tâche de comparaison entre deux problèmes résolus est demandée (Cummins, 1992) et si les problèmes ont des traits de surface éloignés (Gick et Holyoak, 1983 ; Bassok et Holyoak, 1989 ; Bassok, 1990 ; Quillici et Mayer, 1996, 2002). Par ailleurs, une généralisation par adaptation serait mise en œuvre lorsque les sujets adaptent la solution d'un problème source pour résoudre un problème cible si l'habillage des deux problèmes est similaire (Ross et Kennedy, 1990). Nous avons donc fait varier la tâche demandée et la similarité entre problèmes afin d'étudier l'effet conjugué de ces deux facteurs sur la mise en œuvre de processus de généralisation. Dans l'expérience réalisée, les apprenants devaient soit comparer soit

adapter deux paires de problèmes pour chacun des deux principes théoriques présentés. La généralisation de connaissances était évaluée lors d'un post-test. Dans toutes les conditions, les résultats obtenus sur le post-test ont été très faibles (20% de réussite en moyenne au post-test). Les sujets n'ont pas construit de connaissances suffisamment générales pour réussir le problème transfert. Nous avons proposé plusieurs explications à cette absence de généralisation. D'abord, les exemples proposés étaient peut-être trop similaires pour conduire à une généralisation par détection de similitudes. Par ailleurs, il est envisageable que la possibilité de consulter le problème source lors de l'adaptation ait limité la mise en œuvre d'une généralisation de connaissances par adaptation.

En résumé, la première étude montre que réduire la saillance de l'élément pertinent pour la résolution favorise la construction d'une connaissance plus générale. Même si nous n'avons testé qu'un facteur, cette étude permet de confirmer que certains facteurs liés au mode de présentation des exemples déclenchent la mise en œuvre de processus de généralisation.

Dans la seconde étude, la manipulation des facteurs identifiés dans la littérature n'a pas conduit au déclenchement de la mise en œuvre de processus de généralisation. Si cette seconde étude n'a pas permis de confirmer notre hypothèse, elle ne la remet pas en cause. Par ailleurs, elle met en évidence différentes questions qui restent à élucider pour mieux comprendre sur les conditions nécessaires au déclenchement des processus de généralisation.

5.2. Perspectives

D'autres études doivent être conduites pour mieux comprendre les facteurs qui déclenchent les différents processus d'apprentissage.

(1) Si nous avons identifié différents facteurs qui semblent jouer un rôle dans la mise en œuvre de généralisation de connaissances, ces facteurs semblent pour l'instant difficiles à manipuler pour déclencher la mise en œuvre de processus de généralisation. Une première question se pose alors : quelle est l'importance des effets mis en évidence dans les différentes expériences sur lesquelles nous nous appuyons ?

Il est à noter que les différentes études présentées dans la section 2.3 qui mettent en évidence des facteurs qui semblent jouer un rôle sur la mise en œuvre de processus présentent souvent des résultats isolés, non répliqués dans d'autres contextes. Il est donc difficile de savoir dans quelle mesure les résultats obtenus peuvent être généralisés à d'autres situations. Or, si l'on souhaite déclencher des processus de généralisation en manipulant différents facteurs, il semble important de vérifier auparavant l'importance et la robustesse des effets de ces facteurs en mesurant leur taille (voir par exemple Howell, 1998, p.373-377) ; on peut en effet supposer que plus l'effet est important et robuste, moins il sera sensible aux variations de la situation.

(2) Parmi les facteurs mis en évidence, les similarités de surfaces entre problèmes semblent jouer un rôle important dans la mise en œuvre du processus de généralisation. Il semble que la présentation de problèmes ayant des habillages très différents favorise un processus de détection de similitudes Gick et Holyoak, 1983 ; Bassok et Holyoak, 1989 ;

Bassok, 1990, Quillici et Mayer, 1996, 2002), alors que pour faciliter la généralisation par adaptation, il semble que les problèmes doivent être plutôt similaires (Ross et Kennedy, 1990).

Il semble cependant qu'il soit difficile de manipuler les similarités de surface des problèmes pour déclencher ces processus. En effet, différents types de similarités de surface semblent pouvoir être distingués. Leur caractérisation varie suivant les auteurs. Ross (1987, 1989) distinguent les similarités de surface liées à l'histoire proposée et les similarités liées aux entités présentes dans les énoncés (object mapping view). Holyoak et Thagard (1989 ; 1995 ; Hummell et Holyoak, 1997) considèrent plutôt le degré de similitudes sémantiques entre les objets présents dans les différents problèmes. Celui-ci dépend de l'organisation sémantique des connaissances en mémoire. Bassok, Wu et Olseth (1995) vont plus loin en montrant que les connaissances sémantiques des sujets sur les objets et sur les relations entre les objets décrits dans la situation orientent la structure abstraite qu'ils construisent à partir de l'énoncé. Ainsi, des traits a priori non pertinents pour la résolution, comme le fait que des personnes choisissent des objets ou des animaux, peuvent permettre aux participants d'inférer la solution du problème. Cette structure abstraite « interprétée » diffère de la structure qui détermine la solution de ce type de problèmes, elle permet de résoudre certains problèmes partageant les mêmes traits, mais induit les apprenants en erreurs lors de la résolution de problèmes isomorphes un peu différents.

A la suite de ces différentes études, il semble donc qu'une meilleure compréhension de l'influence des similarités entre problèmes passe d'abord par une caractérisation plus fine des indices qui conduisent les apprenants à construire une représentation « interprétée » du problème différente de la structure qui détermine la solution. Dans ce sens, Sander et collaborateurs (Sander et al., 2003) cherchent à mettre en évidence différentes caractéristiques qui provoquent certaines inférences dans le domaine des problèmes additifs.

(3) Une troisième question porte sur les conditions de mise en œuvre de processus d'adaptation. Celui-ci est encore méconnu et mériterait d'être mieux étudié. Si Ross et Kennedy (1990) ont montré que la généralisation par adaptation pouvait avoir lieu si les problèmes source et cible étaient suffisamment proches, la similarité entre problèmes ne semble pas être une condition suffisante. Dans ce sens, Didierjean (2003) a montré que la généralisation avait lieu lorsque les problèmes étaient proches, uniquement si les sujets la mettaient en œuvre délibérément. Dans l'expérience que nous avons réalisée, un autre facteur a pu nuire à la généralisation par adaptation : l'accès à la source. En effet, dans l'étude de Ross et Kennedy (1990), le problème source n'est pas accessible au moment de résoudre la cible. En revanche, dans notre expérience, l'apprenant avait accès à la source. Il nous paraît donc intéressant d'approfondir les études sur les conditions permettant la généralisation par adaptation en conduisant d'autres expériences permettant d'étudier plus particulièrement l'effet d'un délai entre la présentation du problème source et du problème à résoudre sur la généralisation.

(4) Comme nous l'avons rappelé précédemment, l'étude de Didierjean (2003) montre que le processus de généralisation par adaptation doit être mis en œuvre de manière délibérée par l'apprenant. Est-il nécessaire que chacun des processus soit mis en œuvre

délibérément pour qu'une connaissance générale soit construite ? ou est-il possible que ces processus soient mis en œuvre automatiquement, sans accès à la conscience ou sans volonté de généraliser ?

Certaines études montrent que les apprenants pourraient être sensibles à la présence de régularités de manière automatique (Anderson, Kline et Beasley, 1979; Carbonell, 1983; Michalski, 1983), sans qu'il y ait accès à la conscience de la connaissance élaborée (Reber, 1989). Le processus de détection de similitudes pourrait donc parfois être automatique. Quant aux autres processus la question reste sans doute à approfondir.

Si les processus doivent être mis en œuvre délibérément pour produire des connaissances générales, identifier les facteurs qui déclenchent les processus d'apprentissage revient alors à identifier d'une part les conditions qui motivent l'apprenant à mettre en œuvre ces processus et d'autre part, à rechercher les facteurs qui augmentent l'efficacité de ces processus (tels que la dissimilarité entre exemples).

Selon ce point de vue, demander de comparer des problèmes, est sans doute moins efficace que de proposer un enjeu à l'activité proposée.

(5) Par ailleurs, comme nous l'avons souligné, les sujets disposent d'une pluralité de mécanismes d'apprentissage. Dès lors, une des questions qui reste à étudier concerne leurs interactions. Si, pour des raisons de simplification, les travaux sur les processus d'apprentissage se sont la plupart du temps centrés sur un seul processus à la fois, il est probable que les apprenants en utilisent plusieurs, tour à tour ou simultanément. Par exemple, détecter des similitudes n'empêche pas d'essayer d'établir des liens causaux. Il reste à développer des recherches visant à mieux comprendre comment « coexistent » les processus d'apprentissage. Les travaux visant à observer en situation « naturelle » comment les sujets apprennent, tels que ceux développés dans les recherches sur les auto-explications, offrent sans doute dans un premier temps un bon moyen d'étudier ces questions.

(6) Enfin, la question de l'optimisation de l'apprentissage ne peut écarter celle de l'étude des différences individuelles. Certains travaux ont pu mettre en évidence l'existence de différences individuelles dans le recours aux différents processus d'apprentissage. Il semble indispensable d'avancer dans cette voie. Ces différences individuelles sont-elles le fruit de contraintes cognitives : par exemple un processus pourrait nécessiter plus de ressources cognitives que d'autres ? Sont-elles le reflet de véritables « styles » cognitifs ? Dans tous les cas, mieux comprendre les sources des différences, leur caractère stable ou non, est une des clés d'une bonne compréhension des phénomènes d'apprentissage à partir d'exemples.

Partie 2 : Concevoir des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) qui facilitent l'acquisition de connaissances à partir d'exemples

Introduction

Dans la première partie, nous avons décrit les différents processus de généralisation qu'un apprenant peut mettre en œuvre sur des exemples pour acquérir des connaissances (des schémas). Puis nous avons identifié différentes conditions qui semblent faciliter la mise en œuvre de ces processus.

Dans cette seconde partie, nous comptons nous appuyer sur les conditions identifiées dans la première partie afin de concevoir des environnements informatiques qui facilitent l'apprentissage à partir d'exemples dans le cadre du projet AMBRE.

Le projet AMBRE est une recherche pluridisciplinaire conduite dans l'équipe Cognition, Expérience et Agents Situés (CEXAS) au sein du LIRIS (Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information) en relation avec l'ERTé e-praxis. Ce projet propose de

concevoir des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) qui favorisent l'acquisition d'une méthode pour résoudre des problèmes. Acquérir une méthode consiste à apprendre à reconnaître à quelle classe de problèmes appartient un nouveau problème et à résoudre le problème en appliquant la technique de résolution associée à cette classe de problèmes. Acquérir une méthode dans un domaine donné consiste donc à savoir reconnaître le schéma qui correspond au problème à résoudre et à appliquer ce schéma pour trouver sa solution.

Pour favoriser l'acquisition de telles méthodes, l'idée du projet est de concevoir des EIAH qui incitent l'apprenant à mettre en œuvre un raisonnement par analogie en guidant la résolution de problèmes en suivant les étapes du Raisonnement à Partir de Cas (RàPC). Suivant ce principe, l'environnement doit guider l'apprenant en le conduisant à reformuler le problème à résoudre, puis à trouver un problème proche parmi les problèmes déjà vus avant d'adapter la solution du problème choisi pour résoudre le nouveau problème. Pour assister l'apprenant et diagnostiquer ses erreurs, l'environnement intègre un système à base de connaissance. Ainsi, si l'apprenant commet des erreurs, celui-ci peut lui apporter des rétroactions appropriées.

L'objectif du projet AMBRE est de montrer que le raisonnement à partir de cas peut être utilisé comme une stratégie d'apprentissage dans un EIAH.

Pour tester cette hypothèse, nous avons réalisé dans le cadre d'un stage de DEA (Nogry, 2001) une première maquette d'EIAH dans le domaine des dénombrements. L'évaluation de cette maquette n'a pas permis de conclure à un impact du principe de AMBRE sur l'apprentissage de la méthode (Nogry, Jean-Daubias et Guin-Duclosson, 2002). Cette première étude a toutefois soulevé différentes questions relatives à la pertinence de certains choix de conception et a montré les difficultés posées par l'évaluation de tels systèmes.

Pour dépasser ces difficultés, nous cherchons à ancrer plus profondément les choix de conception en faisant référence aux études faites en psychologie cognitive. En outre, il nous semble important de reconsidérer la question de l'évaluation de l'impact d'un EIAH sur l'apprentissage.

Notre contribution au sein de ce projet consiste donc à nous assurer de l'adéquation des EIAH conçu suivant le principe du projet AMBRE avec leur objectif : l'acquisition de la méthode. Pour cela, nous avons d'abord cherché à identifier les conditions qui pourraient favoriser l'apprentissage dans le cadre de AMBRE en nous appuyant sur les études en psychologie qui portent sur l'apprentissage à partir d'exemples. Ceci nous a conduit à produire des recommandations pour la conception d'un EIAH fondé sur le principe de AMBRE. Notons qu'au moment où ces recommandations ont été produites, nous n'avions pas encore les résultats des différentes expériences que nous avons réalisées. Les recommandations ont donc été produites uniquement sur la base de la revue de littérature sur l'apprentissage à partir d'exemples.

Nous avons ensuite participé à la conception de l'EIAH AMBRE-add, destiné à faciliter l'apprentissage d'une méthode dans le domaine des problèmes additifs.

Finalement, nous avons évalué ce logiciel afin de mesurer l'impact du principe de AMBRE sur l'apprentissage.

Cette partie relate les différents travaux que nous avons réalisés dans le cadre du projet AMBRE. Le chapitre 6 présente d'abord le domaine de recherche des EIAH en explicitant les différentes questions qui se posent lors de la conception d'un EIAH. Nous y abordons également les questions relatives à la manière dont les théories et données empiriques issues de la psychologie peuvent être utilisées pour la conception des EIAH.

Dans le chapitre 7, nous présenterons le projet AMBRE en précisant ses fondements, le principe qu'il propose, et la démarche de conception que nous avons suivie dans ce projet. Le chapitre 8 décrit les différentes recommandations que nous avons proposées pour la conception d'EIAH sur le principe de AMBRE.

Le chapitre 9, présente AMBRE-add, le logiciel conçu et développé selon le principe de AMBRE pour le domaine des problèmes additifs. Le chapitre 10 passe en revue les différentes méthodes d'évaluation pouvant être utilisées afin d'évaluer un EIAH et le chapitre 11 présente les différentes expériences que nous avons conduites pour évaluer le logiciel AMBRE-add. Enfin, le chapitre 12 nous permettra de discuter des différents résultats obtenus et de la démarche que nous avons mise en œuvre dans ce projet.

Chapitre 6 : Quelles collaborations interdisciplinaires pour la conception des EIAH ?

Les travaux présentés dans cette partie s'intègrent au domaine de l'EIAH, *Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain*. Ce domaine de recherche étudie les problématiques liées à la conception d'artéfacts informatiques destinés à favoriser l'apprentissage humain. Dans ce chapitre, nous proposons d'abord ce domaine à travers une perspective historique, puis nous présentons la question des fondements théoriques des EIAH en développant plus particulièrement les apports de la psychologie cognitive à ce domaine.

6.1. Bref historique du domaine

Issu de *l'enseignement programmé* (voir par exemple Skinner, 1954, cité par Bruillard, 1997) le domaine de recherche des EIAH a beaucoup évolué en bénéficiant d'une part des idées et techniques développées en informatique (intelligence artificielle, hypertextes, réseaux) et d'autre part des recherches en sciences de l'éducation et en psychologie (cf. Bruillard, 1997 pour une présentation historique de ce domaine). Suivant le principe de l'enseignement programmé, l'ordinateur a d'abord été utilisé pour dispenser des cours prédécoupés. L'apprenant était alors orienté vers différentes parties du cours suivant ses réponses à des questionnaires dispensés après les différentes sections du cours. L'ordinateur est ensuite devenu plus qu'un support de cours. Avec le développement de *l'enseignement assisté par ordinateur* (EAO), les chercheurs ont à développé des systèmes destinés à guider l'instruction, en enregistrant les cheminements et les réponses de l'élève et en modifiant la stratégie d'apprentissage en fonction des réponses

obtenues.

Avec l'intégration de l'Intelligence Artificielle (IA) à partir des années 70, le domaine a évolué et s'est développé sous le nom d'*enseignement intelligemment assisté par ordinateur* (EIAO). Les chercheurs ont alors cherché à développer des « tuteurs intelligents », des systèmes capables de tutorer l'apprenant en diagnostiquant ses erreurs, puis en lui proposant des explications adaptées. De tels systèmes doivent être « experts » du domaine, « experts » de la pédagogie, et posséder des connaissances sur les compétences et connaissances correctes et erronées des élèves. La conception de tels systèmes a fait émerger de nouvelles problématiques : comment modéliser les connaissances du domaine et les stratégies d'apprentissage ? Comment modéliser les connaissances et les compétences de l'apprenant ? Comment diagnostiquer ses actions et ses conceptions ? Quelles explications doivent être fournies à l'apprenant et sous quelle forme les présenter pour qu'elles lui permettent de progresser ? Bruillard (1997, chapitre 3) présente une synthèse des études ayant abordé ces questions.

Parallèlement à ces travaux, une autre approche radicalement différente s'est développée dans les années 70. Contrairement aux tuteurs intelligents, dans lesquels la machine contrôle l'interaction, cette approche propose de créer des environnements entièrement contrôlés par l'apprenant dans lesquels il peut exprimer ses idées et en explorer les conséquences, des *micromondes*. Pour que l'apprenant puisse prendre conscience des conséquences de ses actions, les rétroactions de l'environnement jouent un rôle central. Ces rétroactions peuvent être proposées sous forme langagière mais aussi sous forme graphique (par exemple à travers une modification de l'image affichée à l'écran). Le logiciel LOGO (Papert, 1987), qui propose un apprentissage par la programmation, est sans doute le micromonde le plus célèbre. Cet environnement a rencontré un succès important et s'est largement diffusé avec l'essor des micro-ordinateurs. Il a fait l'objet de nombreuses évaluations (Bruillard, 1997, p.151-154 pour une synthèse). Il en ressort que l'utilisation de micromonde est très motivante pour les apprenants, et leur offre une liberté totale, mais, comme le souligne Balacheff (1994, a) « un micromonde offre un environnement riche, mais il ne peut par lui seul garantir un apprentissage donné ». Pour permettre à l'apprenant d'atteindre un but et d'apprendre par la découverte, il doit être soutenu, assisté dans son activité, soit par l'enseignant, soit par l'environnement lui-même.

Ces deux approches relèvent de deux visions différentes de l'éducation. Néanmoins, elles mettent toutes les deux en avant l'importance de l'interaction entre l'apprenant et le système et posent la question du contrôle de l'interaction et du guidage de l'activité.

Par la suite, le domaine a été renommé *Environnements Interactifs d'Apprentissage avec ordinateur* (Baron, Gras, et Nicaud, 1991) puis *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain*. Les recherches se portent actuellement sur le partenariat entre l'homme et la machine : « il semble de plus en plus que l'intelligence est à trouver dans l'interaction entre l'usager et la machine » (Bruillard, 1997).

La notion d'EIAH recouvre actuellement une grande diversité de systèmes : les environnements support aux situations d'apprentissage de type tuteurs intelligents ou micromondes, mais aussi les environnements supports de pédagogie de projet, les outils de communication conçus pour favoriser les aspects pédagogiques de la collaboration, ou

les navigateurs hypermédia conçus pour favoriser l'apprentissage, etc.

6.2. Les problèmes soulevés par la conception des EIAH

Dans le cadre du projet AMBRE, nous nous intéressons plus particulièrement aux EIAH supports aux situations d'apprentissage (Tchounikine, 2002, a). Ceux-ci visent à créer des situations d'apprentissage à travers une activité individuelle afin de favoriser l'acquisition de compétences ou de concepts précis pour lesquels les interactions et les processus d'apprentissage sont considérés comme des facteurs clés (Tchounikine, 2002a).

La conception de tels systèmes exige de nombreux pré-requis (Tchounikine, 2002a, Tricot, 2003) et nécessite de préciser différents aspects, parmi lesquels on peut citer :

- L'analyse didactique du contexte (l'analyse des conceptions des élèves, des obstacles à l'évolution de ces conceptions, etc.) ;
- l'identification des objectifs d'apprentissage ;
- la conception et la spécification de l'activité proposée. Ce point nécessite de concevoir la tâche à réaliser et les supports à cette tâche mais aussi de définir le type d'interaction entre l'apprenant et le système en précisant le degré de guidage, les rétroactions du système, le type d'assistance à la tâche, etc. ;
- les conditions d'utilisation du système en termes de temps, de lieu, de ressources humaines ou informationnelles ;
- les ressources disponibles pour la conception et les contraintes qui pèsent sur elle ;
- l'évaluation du système.

Ces différents pré-requis ne peuvent être satisfaits par les informaticiens seuls. Les EIAH doivent donc être conçus au sein d'une équipe pluridisciplinaire afin de définir les objectifs d'apprentissage, d'identifier les difficultés didactiques et de concevoir une approche pédagogique prenant en compte les possibilités techniques offertes par l'informatique, et la nature des interactions possibles dans un environnement informatique. Savoir comment mobiliser les connaissances issues des différentes disciplines est alors un problème au cours de la conception.

Ces différents points soulèvent de nombreuses questions qui font l'objet de recherches en informatique, en sciences de l'éducation ou en psychologie et à l'interface de ces différentes disciplines.

Parmi les différentes questions de recherches traitées en EIAH, certaines sont relatives aux interactions entre champs disciplinaires dans le cadre de la conception des EIAH (Tchounikine, 2002b). Tchounikine met plus particulièrement en évidence deux problèmes principaux :

- la question des fondements théoriques de la conception des systèmes,
- la question de la validation des systèmes.

Nous présentons ici différents travaux illustrant différents rôles de la théorie pour la

conception d'EIAH.

6.3. Quels fondements théoriques pour la conception des EIAH ?

Si l'approche pluridisciplinaire est communément admise, l'utilisation des théories issues de différentes disciplines (informatique, psychologie cognitive, ergonomie, sciences de l'éducation, didactique des disciplines etc.) pour la conception des EIAH pose différentes questions. Nous présentons ici ces questions du point de vue des interactions entre psychologie et EIAH.

Sur quelles théories s'appuyer ? Bien souvent, les théories développées dans les différentes disciplines citées plus haut sont en constante évolution (conceptions nouvelles ou réinterprétation de conceptions anciennes) ; les théories et les résultats obtenus ne sont pas encore stabilisés au niveau disciplinaire, et ne sont pas articulés avec les travaux des autres disciplines. De plus, les théories sont rarement élaborées spécifiquement pour les EIAH et prennent rarement en compte l'inscription de l'activité dans un environnement informatique (Tchounikine, 2002, b). Faut-il les adapter ? Et si oui, comment ?

Comme le note Balacheff (2002), les concepteurs de systèmes se limitent souvent à faire référence à des théories très générales (théorie constructiviste, théorie de l'activité, etc.). Si ces références permettent de comprendre les intentions des concepteurs et les principes généraux du système, elles ne permettent pas de comprendre comment cette théorie a orienté les choix de conception.

D'autres travaux fondent directement la conception des EIAH sur une théorie de l'apprentissage. Nous en présentons ici deux exemples, tirés de (Tchounikine, 2002, a) :

(1) Plusieurs systèmes (geometry tutor, lisp tutor) ont été construits à partir de la théorie ACT* développée par Anderson et al. (Anderson, Boyle, Corbett et Lewis, 1990). ACT propose un modèle computationnel d'apprentissage fondé sur la notion de compilation des connaissances et dans lequel les processus cognitifs sont représentés par des règles de production. Pour tester la validité de cette théorie, les auteurs en ont tiré différents préceptes opérationnels pour la conception de tuteurs intelligents : mise en place de situations de résolution de problèmes, conception d'un modèle de résolution de problèmes idéal sous forme de règles de production, rétroaction immédiate, etc. La conception des tuteurs, si elle se révèle complexe car fondée sur des analyses très fines permettant de définir les règles de production, n'en est pas moins intrinsèquement liée à la théorie.

(2) Ecolab (Luckin, DuBoulay, 1999) est un système dont la conception est fondée sur les travaux de Vygotsky (1978) sur la zone proximale de développement (ZPD). Suivant l'approche proposée par Vygotsky, les auteurs cherchent à concevoir un système qui joue le rôle de partenaire d'apprentissage et permette à l'apprenant de développer des capacités supérieures à celles qu'il pourrait développer sans interaction. Pour réaliser un tel système, les auteurs ont analysé cette théorie de référence afin de proposer différents types d'interactions possibles (niveaux d'assistance, présentation d'environnements de différents niveaux de difficulté) et différentes spécifications (pouvoir construire un modèle de l'élève, pouvoir calculer la ZPD, etc.). Dans cette approche, l'objectif assigné au

concepteur est de maximiser la « zone of available assistance » (ZAA, qui décrit l'assistance que peut proposer le système) et de proposer les moyens de définir une « zone of proximal adjustment » (sélection de la ZAA appropriée pour la situation) aussi proche que possible de la ZPD de l'apprenant. L'évaluation de ce système montre que les apprenants ont tiré avantage de la grande variabilité d'assistance proposée et ont amélioré leurs performances.

Lorsque, comme dans les exemples précédents, des théories générales sont utilisées pour construire un système, il arrive souvent qu'elles soient justement trop générales et doivent ensuite être interprétées et adaptées pour construire un système. Ainsi, dans le logiciel Ecolab (Luckin et Du boulayn 1999), différents concepts supplémentaires ont dû être produits.

Il est également possible de concevoir des systèmes en se fondant à la fois sur des théories et des études empiriques qui décrivent plus précisément des situations qui favorisent l'apprentissage. Par exemple, comme nous l'avons vu dans la première partie, l'étude de problèmes peut être source d'apprentissage (Cooper et Sweller, 1987 ; Ward et Sweller, 1991, Zhu et Simon, 1987) ; en particulier si les apprenants produisent des auto-explications face aux exemples (Chi et al., 1989, Renkl, 1997 ; Renkl, Stark, Gruber, et Mandl, 1998). De plus, la production d'auto-explications peut être favorisée si les apprenants sont guidés ou si on leur demande explicitement de produire des auto-explications (Bielaczyc, Pirolli et Brown, 1995 ; Chi et al, 1994 ; Neuman et Schwarz, 1998 ; Wong et al., 2002). Partant de ce constat, plusieurs systèmes ont été conçus pour favoriser un apprentissage à partir d'exemples en supportant la production d'auto-explications (Aleven et Koedinger, 2002 ; Conati et Vanlhen, 2000). Nous présentons ici la conception de l'un de ces systèmes : le « self-explanation coach », développé par Conati et Vanlhen (2000). Ce système propose d'appliquer les principes qui se sont révélés positifs lorsqu'ils étaient mis en œuvre par des tuteurs humains. Pour ce faire, les concepteurs ont d'abord identifié dans la littérature les auto-explications corrélées avec un apprentissage que le « self-explanation coach » devrait supporter. Ils ont ensuite construit une interface qui stimule la production d'auto-explications. Pour spécifier ces caractéristiques, les concepteurs ont identifié dans la littérature (Chi et al. 1989) deux formes sous lesquelles les auto-explications sont souvent générées spontanément par les apprenants, puis ils ont conçu des menus déroulants qui permettent de supporter ces deux formes d'auto-explications. Si l'apprenant s'auto-explique peu les exemples, le coach peut intervenir en lui suggérant de produire des auto-explications.

Ces différents exemples montrent qu'il est possible de construire des EIAH sur la base de théories générales de l'apprentissage, mais aussi sur la base d'études empiriques. Les théories ou les résultats empiriques peuvent également être utilisés non pas pour fonder la conception de l'EIAH mais pour résoudre certains problèmes ou orienter certains choix de conception.

Une fois conçus et développés, ces EIAH doivent être évalués. De nombreuses méthodes ont été développées afin d'évaluer un système informatique suivant différentes dimensions, mais ces techniques d'évaluation ne sont pas suffisantes pour évaluer un EIAH. En effet, dans le domaine de l'EIAH l'objet central est l'apprentissage. Avec quelles méthodes évaluer cet apprentissage ? Suivant quels critères ? Comment savoir si

l'apprentissage est dû à l'EIAH et non à des facteurs externes ?

Comme nous le verrons dans le chapitre 10, de nombreuses méthodes issues de différentes disciplines peuvent être adaptées et utilisées pour évaluer les différents aspects d'un EIAH. Le choix des techniques peut se révéler difficile car il dépend de l'objectif du logiciel, de la théorie sous-jacente au logiciel, etc.

Au sein du projet AMBRE, notre contribution consiste d'une part à prendre en compte les résultats issus des études en psychologie cognitive sur l'apprentissage à partir d'exemples pour la conception d'EIAH et d'autre part à évaluer les EIAH ainsi conçus. Dans le chapitre suivant, nous décrirons le projet, ses fondements et ses principes puis nous présenterons la démarche de conception suivie dans ce projet.

Chapitre 7 : Le projet Ambre

Le projet AMBRE (Apprentissage de Méthodes Basé sur le Raisonnement à partir de l'Expérience) (Guin-Duclos, Jean-Daubias et Nogry, 2002) est une étude pluridisciplinaire dont l'objectif est de concevoir des environnements d'apprentissage s'appuyant sur les étapes du cycle du raisonnement à partir de cas (RàPC) pour guider l'acquisition de méthodes. Pour mener à bien ce projet, les phases de conception, d'implémentation et d'évaluation se sont succédées au sein d'une équipe pluridisciplinaire.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les fondements du projet en précisant ce qu'est l'apprentissage de méthodes. Ensuite, nous présenterons le RàPC en précisant les différentes utilisations qui en ont été faites dans le domaine des EIAH, puis nous montrerons comment il pourrait faciliter l'apprentissage de méthodes. Dans une seconde partie de ce chapitre, nous présenterons les méthodes de conception utilisées dans ce projet, puis nous relaterons le cycle de conception du projet en présentant le rôle des différentes personnes qui y ont participé.

7.1. Les fondements du projet

7.1.1. Des EIAH pour enseigner des méthodes

Le projet AMBRE a pour objectif de concevoir des environnements informatiques dans différents domaines permettant d'apprendre une méthode pour résoudre des problèmes dans un domaine donné. Ce projet se fonde sur des recherches en didactique des disciplines qui proposent d'enseigner explicitement des méthodes (Schoenfeld, 1985 ; Robert, Rogalski et Samurçay, 1987 ; Rogalski, 1990, 1994).

Rogalski (1990) définit une méthode comme « la description d'un ensemble d'activités du sujet, portant sur l'analyse et le classement des problèmes à résoudre dans un domaine assez précis, l'utilisation des outils et des techniques disponibles, les stratégies et tactiques possibles, la gestion du temps des choix, des stratégies et de leur

déroulement, la conscience de ces choix, les moyens de contrôle et de retour en arrière pour procéder à d'autres choix... »

Dans le cadre du projet AMBRE, nous restreignons la méthode en considérant qu'elle permet d'organiser une résolution de problème en se fondant sur le classement des problèmes et des outils de résolution.

Notre objectif est que l'apprenant acquière cette méthode. Pour cela, il doit d'une part construire différentes classes de problèmes, et apprendre à reconnaître à quelle classe appartient un nouveau problème. D'autre part il doit apprendre à associer et à appliquer une technique de résolution à chaque classe de problèmes. En d'autres termes, nous voulons que l'apprenant construise des schémas correspondant aux différentes classes de problèmes et soit capable d'appliquer correctement le « bon » schéma pour résoudre un nouveau problème.

Rogalski (1994) propose d'enseigner de telles méthodes à l'aide d'un tuteur intelligent en précisant que le résolveur d'un « tuteur donneur de leçons de méthodes » doit fonctionner selon les méthodes qu'il veut enseigner, et non pas selon des méthodes expertes du domaine concerné. Suivant ces recommandations, les résolveurs que nous utilisons dans le projet AMBRE fonctionnent selon les méthodes que nous souhaitons enseigner. Néanmoins, même si l'on dispose d'une méthode explicite et d'un système informatique capable de l'appliquer, il paraît difficile de la présenter explicitement à l'apprenant. En effet, dans certains domaines, les termes définissant les classes de problèmes et les techniques de résolution ne sont pas utilisés institutionnellement et ne sont pas connus des apprenants. Notre objectif est donc que l'apprenant acquiert lui-même la méthode. La présentation d'exemples et la résolution de problèmes peuvent aider l'apprenant à savoir comment et quand appliquer une technique de résolution (Ross, 1989b).

Un EIAH destiné à acquérir une méthode et proposant une résolution de problèmes a été conçu et développé par le groupe *Combien?* (Le Calvez et al., 1997) pour le domaine des dénombrements. Ce système propose des problèmes de dénombrement et propose de les résoudre en décomposant le calcul en calculs plus simples, c'est-à-dire à dénombrer des possibilités associées aux éléments simples, puis à suivre le principe multiplicatif afin de dénombrer les différentes possibilités de construire des configurations différentes répondant au problème posé. L'idée sous-jacente est de classer les exercices proposés en fonction de leur mode de résolution suivant la méthode et de proposer à l'élève autant de « machines à construire des configurations » qu'il y a de classes de problèmes. L'élève peut ainsi s'entraîner pour un type d'exercice et lorsqu'il sera familier avec les différentes classes de problèmes, il utilisera une machine générale qui lui permettra soit de résoudre directement soit de choisir une machine pour résoudre.

Si cet EIAH semble donner des résultats intéressants (Le Calvez et al., 2004), le principe qu'il propose est très spécifique au domaine des dénombrements. Aussi, nous avons cherché un principe plus générique qui puisse être appliqué dans plusieurs domaines. Nous avons plus précisément choisi de concevoir un système destiné à supporter l'acquisition de méthodes en provoquant une résolution de problèmes par analogie. Pour encourager l'apprenant à résoudre ces problèmes par analogie, le

système structure la résolution en guidant l'apprenant à travers les étapes du raisonnement à partir de cas.

7.1.2. Utilisation du Raisonnement à Partir de Cas

Le Raisonnement à Partir de Cas est un paradigme de résolution de problèmes inspiré du raisonnement par analogie qui consiste à utiliser des situations déjà rencontrées pour résoudre de nouveaux problèmes. Nous décrivons ci-après ce paradigme, la manière dont il est utilisé dans le domaine des EIAH, et plus particulièrement dans le projet AMBRE.

LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

Le Raisonnement à Partir de Cas (Kolodner, 1993) est un paradigme de résolution de problèmes proposé par des recherches en Intelligence Artificielle, fondé sur la réutilisation de problèmes déjà rencontrés, les cas. Il est aussi issu d'études en psychologie cognitive portant sur les modèles de mémoire dynamique (Schank, 1982), ainsi que sur le raisonnement par analogie (Gick et Holyoak, 1983 ; Gentner, 1983). C'est une description computationnelle du raisonnement par analogie intra-domaine. Souvent représenté par un cycle (Figure 19), il peut être décrit par une séquence d'étapes (Aadmodt et Plaza, 1994 ; Mille, 1998) :

- Elaborer un cas cible : à partir du problème à résoudre (le problème cible), le « cas cible » est élaboré en utilisant des connaissances générales et la base de cas afin de formuler le problème cible de manière pertinente.
- Remémorer un cas source : un cas proche (le cas source) est remémoré à partir de la base de cas.
- Adapter le cas source : la solution du cas source est adaptée afin d'obtenir une solution au problème cible.
- Réviser le cas adapté : cette solution est révisée en vérifiant la plausibilité de la réponse proposée en détectant les éventuelles erreurs d'adaptation afin de les corriger.
- Mémoriser le cas cible : le cas cible est mémorisé dans la base de cas pour une réutilisation future. Dans cette étape, le système peut éventuellement réorganiser la base de cas ou l'indexer différemment.

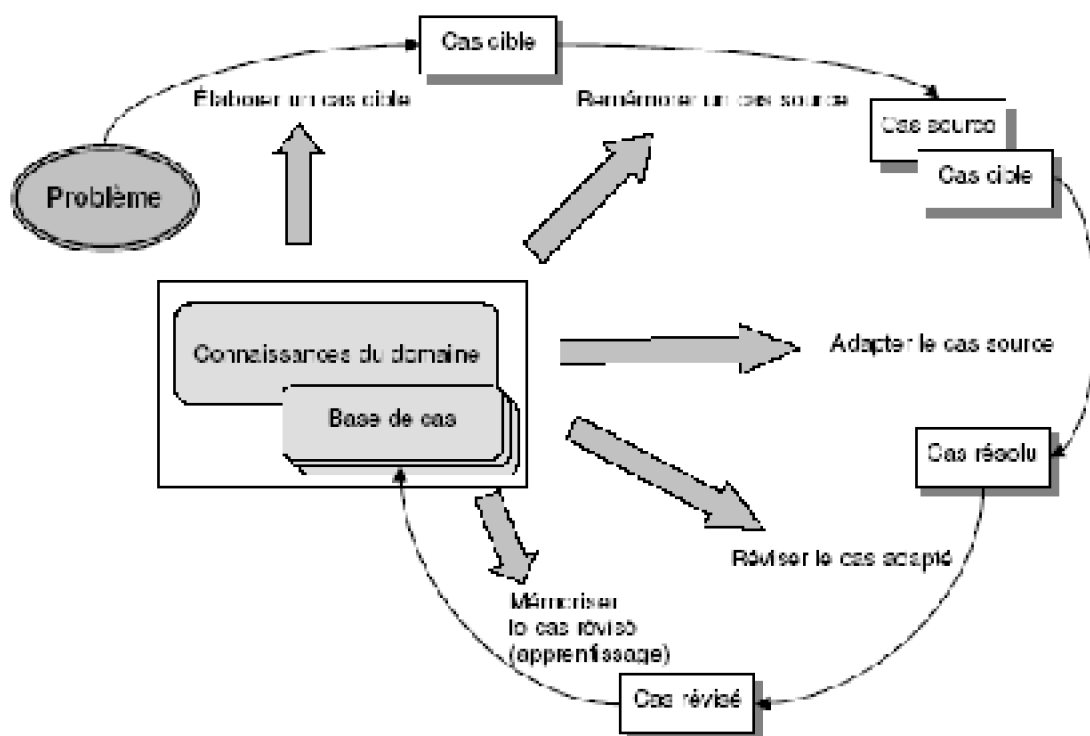


Figure 19 : Le cycle du Raisonement à Partir de Cas

UTILISATION DU RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS EN EIAH

Le raisonnement à partir de cas a souvent été utilisé dans le domaine des EIAH. Il a d'abord été employé comme résolveur de problèmes. Un résolveur utilisant le RàPC peut présenter la solution du problème ainsi que l'ensemble des étapes qui ont conduit à la solution. C'est ainsi que fonctionne le système CATO (Aleven, 2003). Le RàPC peut également être utilisé pour modéliser les connaissances de l'apprenant. Ainsi, il peut permettre de comparer la production de l'apprenant à la solution d'un expert (Shiri, Aimeur et Frasson, 1998), de représenter la progression de l'apprenant (Khan, 2000), ou encore de diagnostiquer ses erreurs (Aka et Frasson, 2002). Le RàPC peut aussi permettre de choisir une stratégie d'apprentissage adaptée à l'apprenant (Gilbert, 2000) ou de proposer des parcours de navigation adaptés à l'apprenant dans un hypermédia (Funk et Conlan, 2002 ; Héraud, 2002 ; Stottler et Ramachandran, 1999) en comparant le modèle de l'apprenant avec les parcours d'autres apprenants (qui forment la base de cas).

L'application la plus proche du principe proposé dans le projet AMBRE est l'enseignement à base de cas (« Case-Based Teaching ») (Schank et Edelson, 1990 ; Masterton, 1997 ; Aleven et Ashley, 1997 ; Bélanger, Thibodeau et Aimeur, 1999 ; Burke et Kass, 1996 ; Capus et Tourigny, 2000 ; Joiron et Leclet, 2003). Les systèmes utilisant cette stratégie d'apprentissage proposent à l'apprenant un cas proche du cas à traiter (le problème à résoudre). Par exemple, le système Foresti (Bélanger, Thibodeau et Aimeur, 1999) propose des problèmes à résoudre, puis présente la solution de l'expert et la solution construite par un système de RàPC afin que l'apprenant puisse comparer sa réponse à celles qui lui sont proposées. L'environnement DIACOM (Joiron et Leclet,

2003) propose une autre forme d'enseignement à base de cas. Cet environnement est un forum qui supporte une activité de formation continue basée sur le partage et la confrontation de cas cliniques. Lorsqu'un utilisateur dépose un cas clinique, le système recherche un cas similaire parmi les cas proposés par d'autres pour encourager la confrontation. Le système choisit le cas clinique en fonction de la similitude de la description du cas, mais aussi en fonction des différences dans la façon dont les cas se résolvent.

Ainsi, suivant l'EIAH, les cas peuvent représenter l'expérience d'un expert ou d'autres apprenants. De plus, plusieurs niveaux d'interactivité entre l'apprenant et le système sont possibles (Tourigny et Capus, 2000). L'apprenant peut demander au système de trouver un cas similaire et d'expliquer comment l'exemple a été résolu. Le système peut aussi être à l'origine de l'interaction en proposant un cas à l'apprenant lorsque cela semble nécessaire. Par exemple, le système SPIEL (Burke et Kass, 1996), destiné à favoriser l'apprentissage de conduites sociales adaptées, présente des cas de conduite sociale adaptée lorsque qu'il détecte que l'apprenant a pris un risque ou qu'il a rencontré un échec dans l'interaction. Ainsi, l'enseignement à base de cas utilise le RàPC pour trouver un cas qui peut aider l'apprenant.

Tout comme l'enseignement à base de cas, le projet AMBRE propose d'aider l'apprenant en lui permettant de se référer à un cas proche pour résoudre un nouveau problème. Cependant, contrairement aux autres systèmes, le cas proche est choisi par l'apprenant lui-même, et non par le système. Pour faciliter ce choix, le système aide auparavant l'apprenant à reformuler le problème à résoudre afin de le comparer plus facilement à la base de cas. Le système propose également un diagnostic des réponses de l'apprenant.

LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS DANS LE PROJET AMBRE

Dans le projet AMBRE, le RàPC n'est pas utilisé par le système mais proposé à l'apprenant comme une stratégie d'apprentissage. L'apprenant doit passer par toutes les étapes du RàPC, de l'élaboration du cas à sa mémorisation, pour retrouver lui-même un cas approprié au problème et l'adapter au problème à résoudre. Ainsi, afin d'aider l'apprenant à acquérir une méthode, l'EIAH présente des exemples prototypiques de chaque classe de problèmes étudiée (problèmes-types) pour initialiser la base de cas. Ensuite, il assiste l'apprenant dans la résolution d'un nouveau problème en le guidant à travers les différentes étapes du cycle du RàPC (Figure 20) :

- l'apprenant doit reformuler le problème afin d'identifier les éléments pertinents pour la résolution (élaboration),
- il choisit, parmi les problèmes-types, un problème proche du problème à résoudre (remémoration),
- il adapte la solution du problème type au problème à résoudre (adaptation),
- il range le nouveau problème dans la base de cas (mémorisation).

Ces étapes sont donc guidées par le système mais effectuées par l'apprenant.

Dans chacune de ces étapes, un diagnostic est réalisé par le système. Celui-ci évalue la production de l'apprenant à la fin de chaque étape et lui propose si nécessaire des explications pour l'amener à comprendre ses erreurs et à corriger ses réponses. Nous considérons que ce diagnostic remplace l'étape de révision présente dans le cycle du RàPC ; ainsi, la révision est distribuée sur les différentes étapes. Le principe du projet AMBRE (le « cycle AMBRE »), décrit dans la Figure 20, est indépendant du domaine. Nous sommes conscientes que suivre ce cycle pour résoudre un problème peut être long. Cependant, dans des domaines où la résolution de problèmes occasionne beaucoup d'erreurs liées à l'identification des caractéristiques du problème et au choix d'une technique correspondante, nous pensons que l'apprentissage à partir d'exemples appuyé par le cycle AMBRE peut favoriser l'apprentissage de méthodes.

L'objectif de ce projet est donc de montrer que des EIAH conçus suivant ce principe peuvent faciliter l'acquisition de méthodes, ceci dans différents domaines d'application.

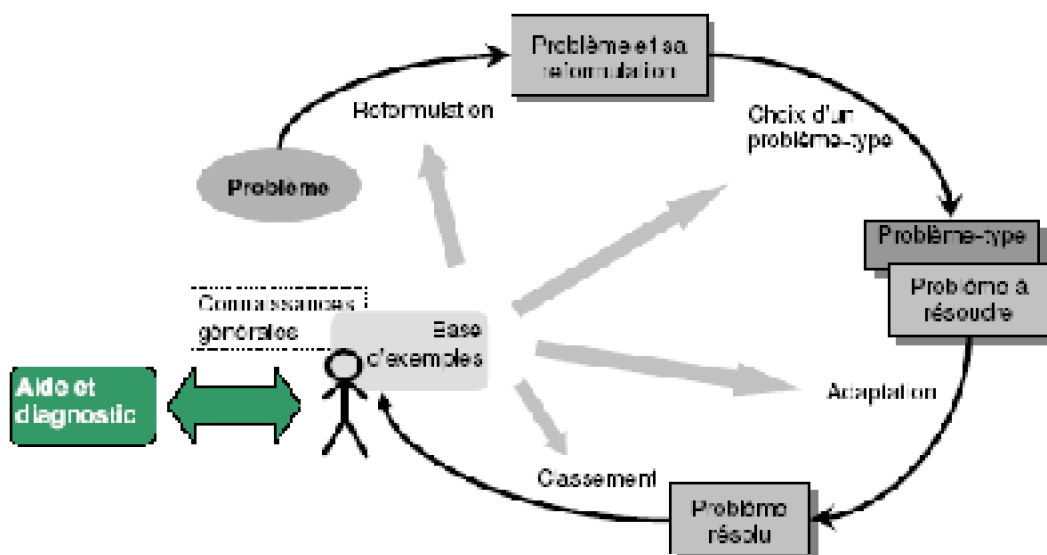


Figure 20 : Le cycle du Raisonement à Partir de Cas adapté au projet AMBRE (« cycle AMBRE ») ; ce cycle décrit les activités de l'apprenant lors de l'utilisation du logiciel

7.2. Conception du projet AMBRE

Pour concevoir et réaliser un environnement d'apprentissage suivant le principe décrit précédemment, plusieurs étapes ont été nécessaires. De part la nature pluridisciplinaire du projet AMBRE, plusieurs partenaires sont intervenus dans chacune de ces étapes : des chercheurs en informatique, mais aussi en psychologie cognitive et en didactique des mathématiques, une conseillère pédagogique, des enseignants et des apprenants. Après avoir présenté les méthodes de conception choisies pour ce projet, nous allons décrire le déroulement du projet en précisant le rôle des différents intervenants.

Parmi les différentes méthodes de conception proposées en génie logiciel, nous avons choisi une méthode de conception incrémentale et itérative. La méthode de **conception incrémentale** consiste à développer d'abord un premier prototype ne

comprenant qu'une partie des fonctionnalités du système puis à ajouter progressivement des fonctions supplémentaires dans les prototypes suivants (Jean, 2000). La **conception itérative** consiste en une succession de phases qui permet d'affiner progressivement les spécifications, d'évaluer les solutions retenues, puis d'intégrer les modifications choisies jusqu'à obtention d'un produit satisfaisant (Van Eylen et Hiraclidès (1996) cité par Jean, 2000). Cette démarche de conception s'appuie sur la réalisation de maquettes et de prototypes qui sont évalués puis éventuellement modifiés.

La conception de AMBRE est donc fondée sur la spécification et l'implémentation de prototypes ne comprenant d'abord qu'un nombre de fonctionnalités limitées. Ces prototypes sont évalués puis conduisent à la production de nouvelles spécifications qui permettent d'implémenter une nouvelle version du logiciel modifiée et complétée par de nouvelles fonctionnalités. Cette démarche a été choisie afin de valider les choix de conception pluridisciplinaires et de détecter les problèmes précocement.

Le déroulement du projet AMBRE peut être décrit par un cycle (Figure 21) inspiré du schéma proposé par Jean (2000) qui représente l'élargissement progressif des utilisateurs, des tests et des validations des logiciels. Durant ce projet, trois systèmes ont été implémentés et évalués.

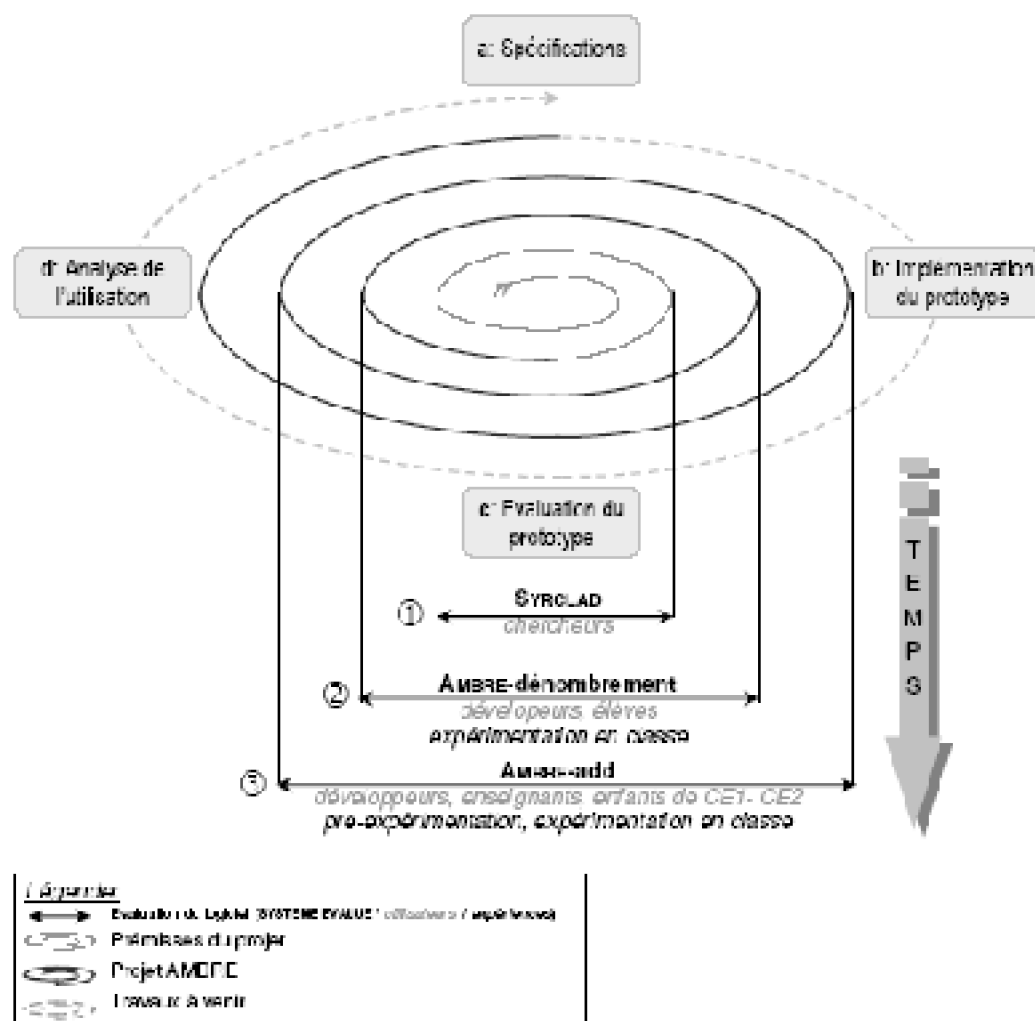


Figure 21 : Cycle de conception du projet AMBRE (élargissement progressif des utilisateurs, des tests et des validations du logiciel)

Tout d'abord, un résolveur, SYRCLAD (Guin-Duclosson, 1999), a été conçu dans le but d'être utilisé par un EIAH destiné à enseigner des méthodes. Ainsi, SYRCLAD résout des problèmes en utilisant les méthodes que l'on souhaite enseigner (Delozanne, 1992 ; Rogalski, 1994) (Figure 21, 1).

Ensuite, des premières spécifications pour la conception d'un EIAH utilisant ce résolveur ont été proposées (Figure 21, 2a). Une équipe de conception composée de chercheuses en informatique dans le domaine des EIAH, Nathalie Duclosson, Stéphanie Jean-Daubias, et de nous-même s'est alors constituée afin de concevoir un premier prototype appliqué au domaine des dénombrements : AMBRE-dénombrement. Nous avons développé ce prototype en implémentant le principe de AMBRE avec un nombre limité de problèmes et des fonctionnalités limitées (le résolveur n'était pas intégré au logiciel) (Figure 21, 2b). Nous l'avons ensuite évalué en classe de terminale scientifique afin de mesurer son impact sur l'apprentissage en utilisant une méthode comparative (Figure 21,

2c). Les résultats de cette évaluation n'ont pas permis de mettre en évidence un effet du logiciel sur l'apprentissage mais nous ont conduits à identifier les difficultés d'utilisation rencontrées par les apprenants et à spécifier de nouvelles recommandations (Figure 21, 3a) (Nogry, Jean-Daubias, Guin-Duclosson, 2002 ; Nogry, 2001).

Dans le but d'améliorer l'impact du logiciel sur l'apprentissage, nous avons fait une revue bibliographique (Nogry et Didierjean, soumis) en psychologie cognitive sur l'apprentissage à partir d'exemples. Cette revue nous a conduit à produire des recommandations plus théoriques pour la conception du logiciel.

A partir de ces recommandations, l'équipe de conception a conçu un EIAH pour la résolution de problèmes additifs (AMBRE-add) (Figure 21, 3b) avec le soutien d'une chercheuse en didactique des mathématiques, Dominique Guin, et d'une conseillère pédagogique, Agnès Remlinger². Cet EIAH intègre une nouvelle interface, le résolveur SYRCLAD et des fonctionnalités d'aide et de diagnostic. AMBRE-add a fait l'objet d'une conception itérative (Figure 22). Ce système a fait l'objet d'une évaluation technique par les développeurs, d'une évaluation analytique par les concepteurs et des enseignants et de plusieurs évaluations empiriques dans lesquelles les apprenants utilisaient le logiciel (Figure 22). Chaque évaluation a été suivie de nouvelles spécifications et de modifications du système.

² cette collaboration a été rendue possible grâce à l'INRP dans le cadre de l'ERTÉ e-praxis et plus particulièrement grâce à Eric Sanchez

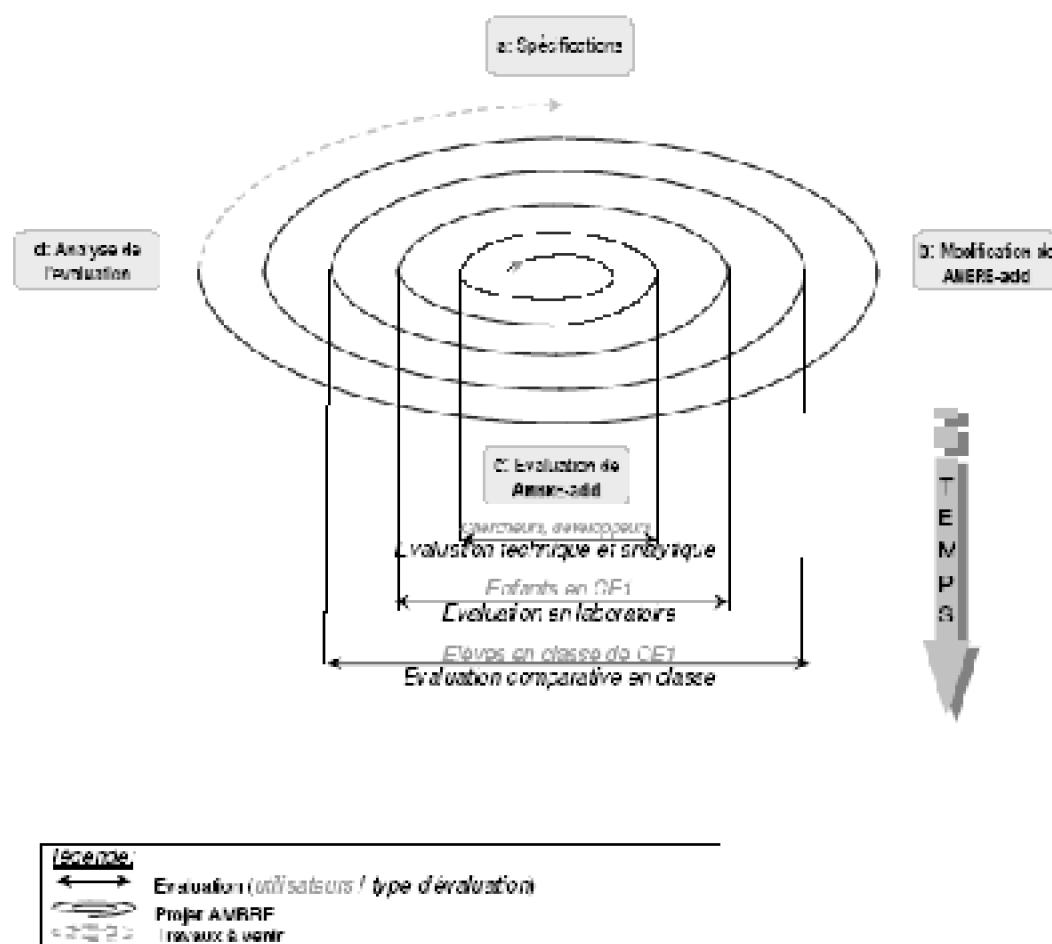


Figure 22 : Cycle de conception du logiciel AMBRE-add

7.3. Bilan

En résumé, le projet AMBRE propose de faciliter l'apprentissage de méthodes en concevant des EIAH qui guident l'apprenant à travers les étapes du raisonnement à partir de cas dans différents domaines d'applications. Ce projet a été développé au sein d'une équipe pluridisciplinaire en suivant un cycle de conception alternant des phases de conception et de développement et des phases d'évaluation.

Comme ce projet est un travail d'équipe, il nous paraît important de préciser notre contribution personnelle. Outre l'implémentation et l'évaluation du prototype AMBRE-dénombrement, nous avons apporté une contribution théorique au projet en proposant des recommandations issues d'une revue de littérature sur l'apprentissage à partir d'exemples. Ces recommandations sont générales et indépendantes du domaine d'application du logiciel. Parallèlement, nous avons contribué à la conception du logiciel

MBRE-add en participant aux choix de conception au sein d'une équipe pluridisciplinaire de chercheurs en EIAH. Finalement, nous avons évalué empiriquement AMBRE-add à travers plusieurs évaluations successives.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les recommandations que nous avons proposées à partir d'études en psychologie cognitive. Ensuite, nous décrirons l'EIAH AMBRE-add en préambule à la présentation des évaluations empiriques du logiciel chapitre 10.

Chapitre 8 : Recommandations pour la conception

Après l'évaluation du logiciel AMBRE-dénombrement qui n'a pas montré d'impact du logiciel sur l'apprentissage, nous avons cherché à préciser le principe du projet AMBRE et la manière de l'appliquer afin de concevoir des systèmes ayant un impact plus important sur l'apprentissage. Pour cela, nous avons d'une part repris les études sur le raisonnement à partir de cas en informatique afin de préciser l'objectif de chaque étape et, d'autre part, nous nous sommes appuyées sur les études réalisées en psychologie cognitive sur l'apprentissage à partir d'exemples. Ces études nous ont permis de préciser et d'explicitier les processus de généralisation que le cycle AMBRE devrait inciter à mettre en œuvre et nous ont conduit à identifier différentes conditions qui peuvent favoriser l'apprentissage à partir d'exemples

Ainsi, à partir des études portant sur la mise en œuvre de ces processus et faciliter ainsi l'acquisition de connaissances, nous avons proposé différentes recommandations³ pour la conception d'EIAH dans le cadre du projet AMBRE.

Il est à noter que les recommandations proposées ici ne sont pas destinées à réduire la charge cognitive (pour des recommandations sur ce point, voir par exemple Bastien et Scapin, 1993 ; Mayer, 2001 ; Mayer et Moreno, 2003). Elles sont destinées à proposer des conditions qui favorisent la mise en œuvre de processus d'apprentissage.

Dans ce chapitre, suivant le principe de AMBRE, nous présenterons d'abord les recommandations portant sur la présentation des exemples. Ensuite nous aborderons la question du choix des problèmes à résoudre. Puis nous passerons en revue les étapes de résolution en précisant pour chaque étape son objectif, les activités à réaliser par l'apprenant, les processus de généralisation que nous souhaitons induire et nos recommandations. Enfin, nous discuterons du diagnostic apporté par le système.

8.1. Présentation des problèmes-types

AMBRE étant destiné à des apprenants plutôt novices, un EIAH AMBRE présente d'abord des exemples résolus (problèmes-types) représentatifs des classes de problèmes à

³ Ces recommandations ont été faites sur la base d'une revue de littérature et non sur la base des expériences présentées dans la première partie (chapitre 3 et 4) mais réalisées après la conception de l'EIAH.

résoudre. En effet, de nombreuses études montrent que pour des apprenants plutôt novices, l'étude des exemples est plus adaptée et plus appréciée que la résolution de problèmes (Anderson, Farrell et Sauers, 1984 ; Carrol, 1994 ; Cooper et Sweller, 1987 ; LeFevre et Dixon, 1986 ; Paas et Van Merriënboer, 1994 ; Pirolli et Anderson, 1985 ; Recker et Pirolli, 1994 ; Quilici et Mayer, 1996 ; 2002 ; Sweller et Cooper, 1985 ; Trafton et Reiser, 1993 ; Ward et Sweller, 1990 ; Zhu et Simon, 1987). De plus, elle peut conduire à une première généralisation de connaissances (Cooper et Sweller, 1987 ; Paas et Van Merriënboer, 1994 ; Quilici et Mayer, 1996 ; Ward et Sweller, 1990).

Par ailleurs, il est possible de faciliter la généralisation de connaissances à partir des exemples étudiés en favorisant la mise en œuvre de différents processus de généralisation. Ainsi, la mise en œuvre d'un processus de détection de similitudes peut être favorisé en choisissant judicieusement les traits de surface des problèmes présentés (Gick et Paterson, 1992 ; Quilici et Mayer, 1996 ; 2002) (cf Partie 1, Chapitre 2). Il est également possible de favoriser la mise en œuvre de processus explicatifs, qui permettent de dégager des connaissances générales en s'auto-expliquant les exemples, en mettant en évidence les buts et sous-buts du problème dans le plan de résolution (Atkinson et Catrambone, 2000 ; Catrambone, 1996 ; 1998 ; voir Van Gog, Pass, Van Merriënboer, 2004 pour une synthèse) ou encore en demandant à l'apprenant de s'auto-expliquer les exemples (Neuman et Schwarz, 1998 ; Wong et al., 2002). Enfin la mise en œuvre d'un raisonnement anticipatif (anticipation de la solution d'un problème puis comparaison avec la solution réelle), également bénéfique pour la généralisation de connaissances (Renkl, 1997), peut être favorisée en présentant la solution du problème de manière séquentielle (Stark, Gruber, Renkl, Mandl et Hinkofer, 1999).

Dans le cadre du projet AMBRE, nous proposons de présenter des exemples résolus représentatifs de différentes classes de problèmes (un seul problème-type par classe de problèmes), le nombre d'exemples présentés devant être ajusté en fonction de la durée de la séance et de l'expertise des apprenants.

Par ailleurs, nous proposons différentes recommandations dans l'objectif de favoriser une première généralisation de connaissances à partir de ces exemples. D'abord, lorsque le domaine d'application le permet, nous proposons de mettre en évidence les sous-buts dans le plan de résolution du problème. Si le domaine d'application ne le permet pas, nous proposons de présenter le problème de manière séquentielle pour faciliter un raisonnement anticipatif. Par ailleurs, nous voulons favoriser un processus de détection de similitudes. Pour cela, nous proposons de choisir des exemples qui ont des traits de surfaces identiques (par exemple, des problèmes dans lesquels l'objet manipulé est toujours le même). En effet, les exemples présentés étant non isomorphes (un problème-type par classe de problèmes) la présence de traits de surfaces identiques devrait permettre aux apprenants de mettre facilement en évidence des différences structurales entre problèmes (Gick et Paterson, 1992 ; Ross, 1989 b). Par ailleurs, nous proposons de clore la phase de présentation des exemples par un « bilan des problèmes-types » dans lequel tous les exemples sont présentés côte à côte, ceci afin de faciliter leur comparaison.

8.2. Résolution de nouveaux problèmes

Après avoir présenté les problèmes-types, un EIAH AMBRE propose de résoudre différents problèmes en étant guidé à travers les étapes du raisonnement à Partir Cas. Dans cette section, après avoir présenté différentes recommandations pour choisir les problèmes à résoudre, nous présenterons le « cycle » AMBRE, en décrivant les différentes étapes de résolution, en explicitant leur objectif, les activités proposées et les processus que l'on veut induire, et les recommandations proposées.

8.2.1. Choix des problèmes

Comme nous l'avons vu dans la partie 1, le choix des problèmes donnés à résoudre peut avoir une importance sur la généralisation de connaissances. Aussi, nous proposons d'abord de présenter un problème représentatif de chaque classe étudiée ayant des traits de surface proches de ceux des problèmes-types. En effet, comme les apprenants sont plutôt novices, ils ont d'abord plus de facilité à résoudre des problèmes relativement semblables aux exemples étudiés (Cooper et Sweller, 1987), les similarités de surface entre problèmes facilitant l'accès au problème source ainsi que son adaptation (Ross, 1984 ; 1987 ; 1989). De plus, l'étude et la résolution de problèmes proches peut faciliter l'acquisition de connaissances générales (Ross et Kennedy, 1990 ; Ross et Kilbane, 1997). En effet, une généralisation peut avoir lieu lors de l'adaptation de la solution d'un problème proche pour construire la solution du problème « cible ».

Ensuite, il semble important de présenter des problèmes ayant des traits de surface plus éloignés, afin que les apprenants apprennent à faire abstraction des traits de surface lors de la résolution de problèmes isomorphes.

8.2.2. Reformulation (élaboration)

La première étape du cycle AMBRE consiste à reformuler le problème afin qu'il soit plus facilement comparable avec les problèmes-types. Pour ce faire, deux options sont envisageables :

- Une première option consiste à demander à l'apprenant d'explicitier tous les éléments du problème, pertinents ou non pour la résolution. L'apprenant devra ensuite déterminer dans les étapes suivantes quels éléments utiliser pour choisir un problème proche et résoudre le problème. Cette alternative permet à l'apprenant d'identifier lui-même par l'expérience ce qui est pertinent de ce qui ne l'est pas. Cependant, si la situation est riche, l'explicitation de tous les éléments de la situation, peut demander se révéler ardue, et faire oublier à l'apprenant le but à atteindre.
- Une seconde option est de demander à l'apprenant d'extraire les éléments pertinents pour la résolution. Cette solution suppose que l'apprenant sache différencier les traits pertinents des autres éléments ou, à défaut, qu'il comprenne pourquoi ces traits-là seulement sont retenus pour la suite de la résolution. Cette alternative permet de construire une représentation du problème plus facilement comparable avec les

problèmes-types. Cependant, il peut être nécessaire de guider l'apprenant pour identifier les traits pertinents par des indications au cours du choix et par un diagnostic sur ses réponses.

Dans un souci de clarté, le choix de l'équipe de conception s'est porté sur la seconde option : demander à l'apprenant de construire une représentation ne contenant que les éléments pertinents pour la résolution. Le système guide donc l'apprenant afin qu'il analyse l'énoncé et qu'il construise une représentation du problème ne contenant que les éléments pertinents pour la résolution. La configuration de cette étape (c'est-à-dire le choix de la représentation des traits pertinents) est fortement liée au domaine d'application de l'EIAH.

8.2.3. Choix d'un problème-type (recherche d'un cas proche)

Cette étape consiste à comparer le problème à résoudre aux problèmes-types déjà rencontrés afin de choisir le problème-type qui se résout comme le problème à résoudre. Le but de cette étape est d'abord d'induire chez l'apprenant une activité de comparaison entre le problème à résoudre et les problèmes-types de façon à favoriser la mise en œuvre d'un processus de détection de similitudes. La première évaluation du principe de AMBRE avec la maquette AMBRE-dénombrément a montré que les participants se concentraient sur la sélection d'un problème-type sans prendre le temps de comparer les problèmes. Il faut donc inciter les apprenants à la comparaison, d'abord en précisant dans la consigne qu'il est nécessaire de comparer avant de sélectionner un problème. De plus, lorsque le domaine le permet, nous proposons de mettre à disposition des apprenants un outil (outil rouge-vert) facilitant la comparaison entre les problèmes en mettant en évidence les similarités (en vert) et les différences (en rouge) entre le problème à résoudre et un problème source sélectionné.

Par ailleurs, contrairement à la première maquette, dans laquelle les problèmes-types étaient représentés uniquement par leur reformulation, nous proposons de présenter les problèmes-types à la fois par leur énoncé et leur reformulation. Ainsi, l'apprenant peut observer que des problèmes différents peuvent avoir la même reformulation.

Après avoir comparé les problèmes, l'apprenant doit sélectionner le problème source qui sera le plus facilement adaptable. Comme les problèmes-types ont des traits de surface identiques, la sélection du problème-type ne peut se faire que grâce aux traits pertinents pour la résolution, soit à l'aide de l'énoncé soit en utilisant la reformulation du problème.

Cette étape devrait donc permettre une détection de similitudes entre le problème à résoudre et les problèmes-types qui devrait conduire l'apprenant à identifier les traits de structure qu'il pourra utiliser pour sélectionner un problème-type.

8.2.4. Adaptation

Cette étape consiste à résoudre le problème « cible » en adaptant la solution du problème-type choisi.

Dans le projet AMBRE, cette étape a pour but non seulement d'appliquer la technique

de résolution d'un problème à un nouveau problème et par là d'apprendre la technique de résolution, mais aussi de permettre la mise en œuvre d'un processus de généralisation de connaissance par adaptation. Pour faciliter cette adaptation, le principe de AMBRE est de présenter le problème-type choisi en parallèle avec le problème à résoudre.

Pour les apprenants ayant des difficultés à adapter, nous proposons, lorsque le domaine d'application le permet, de faciliter la comparaison entre les problèmes et la mise en relation entre l'énoncé du problème et sa solution par un outil d'assistance. Cet outil permet d'une part de visualiser à l'aide de couleurs les éléments ayant les mêmes fonctions dans le problème-type choisi et dans le problème à résoudre (Figure 23, 1), représentés tous deux par leur énoncé et leur reformulation. D'autre part il permet de mettre en relation les éléments de l'énoncé du problème-type avec sa reformulation et son plan de résolution (Figure 23, 2). Ce faisant, avec l'aide de cet outil, l'apprenant devrait visualiser plus facilement les éléments de l'énoncé qui jouent un rôle dans la résolution du problème-type.

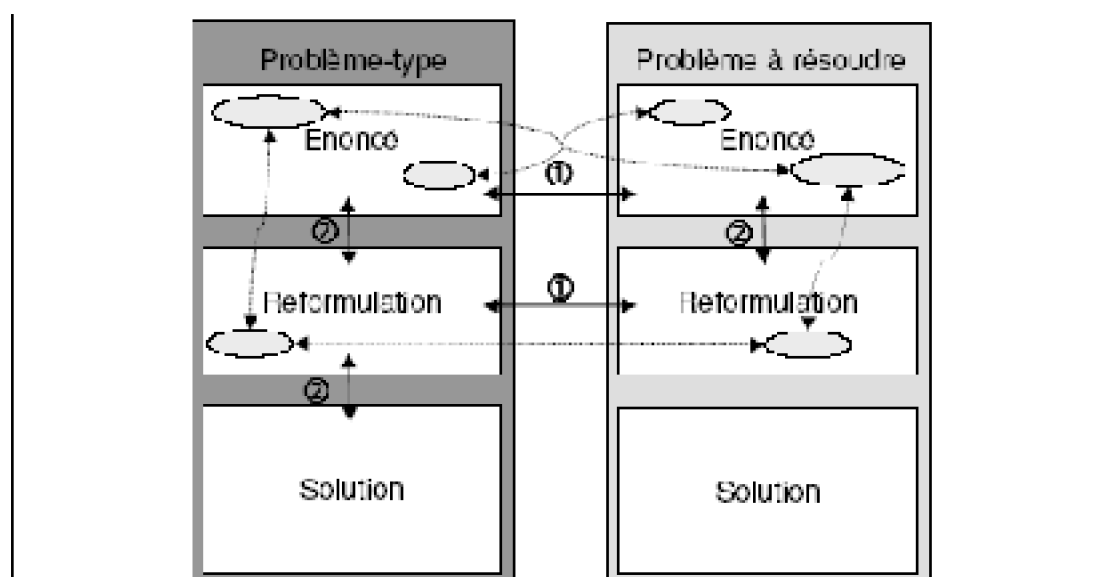


Figure 23 : Comparaisons permises grâce à l'outil d'assistance à l'adaptation

8.2.5. Classement

L'objectif de cette dernière étape est d'intégrer le problème résolu dans la base de problèmes déjà rencontrés par l'apprenant.

Avant de classer le problème, nous proposons que le système récapitule d'abord la résolution du problème. En effet, de par le principe de AMBRE, la résolution peut paraître morcelée. Le résumé de la résolution peut permettre à l'apprenant de mieux percevoir l'unité de la résolution.

Ensuite, le système demande à l'apprenant de regrouper le problème résolu avec les problèmes se résolvant de la même manière. De cette façon, il crée explicitement des catégories de problèmes. Afin de limiter le nombre d'informations à traiter, les groupes de problèmes existants sont représentés par un problème-type. Pour que l'apprenant soit

plus actif dans la construction des groupes de problèmes, cette étape de classement peut être complétée par une activité de réorganisation. Cette activité pourrait permettre à l'apprenant de comparer les problèmes entre eux, d'annoter les problèmes et les groupes de problèmes pour les caractériser, ou encore de créer des sous-groupes pour construire une hiérarchie. Cette activité de réorganisation est indépendante de la résolution ; il n'est sans doute pas pertinent de la proposer à la fin de la résolution de chaque problème mais plutôt après avoir résolu un nombre significatif de problèmes de différentes classes.

8.3. Diagnostic

Au cours de ce cycle, l'apprenant doit être capable d'évaluer la pertinence de ses réponses afin de corriger ses erreurs et de progresser. Pour l'aider, l'EIAH peut diagnostiquer ses réponses et lui fournir des explications sur ses erreurs grâce à un système à base de connaissances. Quel diagnostic apporter et à quel moment ? Nous n'avons pas fait de recherche bibliographique systématique sur ce point, celui-ci ne faisant pas partie de notre sujet d'étude principal, cependant, voici quelques éléments qui peuvent orienter les choix de conception du diagnostic.

Quel type d'aide et d'explication fournir ? Outre les aides liées à l'interaction avec l'interface, il est nécessaire de proposer une aide et un diagnostic liés au contenu (Tricot, Pierre-Demarcy et El Boussarghini, 1998). Par définition, le contenu est dépendant du domaine d'application de l'EIAH. Il est donc difficile de proposer des recommandations générales sur cette question.

Quand faire un diagnostic ? Faut-il diagnostiquer et proposer une rétroaction dès qu'une erreur est commise ? Ou est-il préférable de laisser l'apprenant prendre conscience de ses erreurs et les corriger seul ?

Chacune des ces deux approches semble avoir ses avantages et ses inconvénients. Une rétroaction immédiate du système permet à l'apprenant d'analyser facilement ce qui l'a conduit à commettre une erreur ; il peut alors les corriger facilement. De plus cela lui évite de se retrouver en échec durant de longs épisodes d'utilisation du logiciel, évitant par là la frustration d'être en erreur. Cependant, ce type de feedback peut conduire l'apprenant à répondre automatiquement sans réfléchir à sa réponse (Anderson et al., 1990). Par ailleurs des études, tant en psychologie qu'en didactique (Brousseau, 1998 ; Anderson, 1983), montrent qu'il est important que l'apprenant réfléchisse à ses actions, prenne conscience de leurs conséquences et soit capable d'identifier lui-même des situations d'impasse ou des erreurs (Pantalano et Sheiffert, 1994) pour les éviter ensuite.

Dans le projet AMBRE, le système à base de connaissances nous permet de diagnostiquer les réponses à chaque étape de la résolution. Néanmoins, le diagnostic n'a pas la même importance dans toutes les étapes, il semble donc pertinent de donner un feedback immédiat dans certaines étapes et de laisser chercher l'apprenant dans d'autres. Pour l'étape de reformulation, il semble préférable que la reformulation proposée soit correcte afin de faciliter ensuite la comparaison entre le problème à résoudre et les problèmes-types. Un diagnostic à la fin de cette étape nous semble donc essentiel. En revanche, le diagnostic à l'issue de l'étape de choix du problème-type nous semble moins

nécessaire. En effet, l'expérience réalisée avec la première maquette nous a montré que les apprenants choisissaient souvent par essai-erreur. Pour éviter cela, il est possible de laisser l'apprenant se rendre compte lui-même dans l'étape d'adaptation que son choix n'était pas le meilleur. En effet, s'il a choisi un problème-type d'une classe différente de celle du problème à résoudre, il aura des difficultés à mettre en correspondance les deux problèmes et pourra ainsi se rendre compte des éléments communs et différents aux deux problèmes. S'il se rend compte de ces difficultés, il faut alors laisser à l'apprenant la possibilité de modifier le choix du problème-type. Le système doit donc être suffisamment flexible pour que l'apprenant puisse naviguer entre les étapes afin de choisir un problème-type plus adapté.

Dans l'étape d'adaptation, un diagnostic en fin d'étape est très important pour valider la résolution du problème. Enfin, pour l'étape de classement, le diagnostic à donner dépend des intentions pédagogiques de l'enseignant et de la présence ou non d'une phase de réorganisation des groupes de problèmes. En l'absence de réorganisation, il semble préférable que l'apprenant construise d'emblée des groupes correspondant aux classes qu'il doit apprendre. Un diagnostic des groupes proposés semble donc nécessaire. En revanche, si une activité permet à l'apprenant de redéfinir les groupes de problème, peut-être est-il bénéfique de le laisser construire et modifier son propre classement durant l'activité de réorganisation. Dans ces conditions, l'aide et le diagnostic interviendraient plutôt durant la réorganisation.

Par ailleurs, chaque étape peut elle-même être composée de plusieurs « sous-étapes ». Par exemple, la construction de la reformulation peut nécessiter l'identification successive de plusieurs éléments à partir de l'énoncé. Faut-il alors diagnostiquer chaque sous-étape ? Nous pensons que ce diagnostic dépend de la complexité de chacune des étapes : si une étape comporte un nombre important de sous-étapes, les apprenants pourraient avoir des difficultés à identifier leurs erreurs si le diagnostic est fait uniquement en fin d'étape.

Quoi qu'il en soit, comme ce logiciel est destiné à être utilisé en classe, l'enseignant doit pouvoir choisir quand effectuer le diagnostic. Le système de diagnostic doit donc pouvoir diagnostiquer les réponses des élèves à la fin de chaque étape et chaque sous-étape.

En outre, nous souhaitons que le système d'aide et de diagnostic permette à l'apprenant de s'auto-évaluer en lui permettant de vérifier lui-même ses réponses, indépendamment du diagnostic automatique ou encore en lui proposant un récapitulatif de ses principales erreurs commises au cours de la résolution.

8.4. Bilan des recommandations

Pour chaque étape du cycle AMBRE, nous avons explicité les activités et les processus de généralisation que nous souhaitons induire à travers l'utilisation du logiciel. Ainsi, différents processus d'apprentissage peuvent être mis en œuvre au cours du cycle AMBRE. Lors de l'analyse des exemples, nous souhaitons que les apprenants s'expliquent les exemples ou mettent en œuvre un raisonnement anticipatif. Lors du « bilan » de la

présentation des problèmes-types, nous souhaitons que les apprenants comparent les exemples. Lors de l'étape de reformulation, les apprenants devraient expliciter les éléments pertinents pour la résolution. Ils devraient comparer le problème à résoudre aux problèmes-types lors de l'étape de choix d'un problème-type, de l'adaptation et du classement. Enfin, ils devraient mettre en œuvre un processus d'adaptation lors de l'étape du même nom. Nous faisons l'hypothèse que la mise en œuvre de tout ou partie de ces processus permette l'acquisition de classes de problèmes et des techniques de résolution associées.

Pour faciliter la mise en œuvre de ces processus, nous avons proposé différentes recommandations sur la base des études existantes sur l'apprentissage à partir d'exemples. Ces recommandations portent sur le contenu des consignes, la manière de présenter les problèmes-types, les traits de surfaces des problèmes-types et des problèmes à résoudre et le type de diagnostic. Nous recommandons également de compléter les étapes de choix d'un problème-type et d'adaptation par des outils facilitant la comparaison, et l'étape de classement par une activité de réorganisation des groupes de problèmes.

Les recommandations proposées dans ce chapitre sont indépendantes du domaine d'application et de l'âge des apprenants. Il convient donc de les moduler suivant ces différents facteurs.

Si ces recommandations générales donnent des pistes pour certains choix de conception, elles ont certaines limites. D'abord, les recherches utilisées pour produire ces recommandations étudient les facteurs qui influent sur l'apprentissage indépendamment les uns des autres et dans des conditions très contrôlées ; très peu d'études portent sur les effets d'interactions de ces différents facteurs. Or, le cycle AMBRE conduit à réaliser différentes activités au cours desquels un nombre important de facteurs interagissent sans qu'on en connaisse les effets sur l'apprentissage. De plus, l'EIAH offre des possibilités que n'offrent pas les activités « papier-crayon » sur lesquelles sont fondées la plupart des études théoriques.

Par ailleurs, nous avons décrit ici les activités que l'apprenant devrait réaliser et les processus qu'il devrait mettre en œuvre dans une utilisation « idéale » du système. Nous avons donc décrit l'utilisation prescrite du logiciel. Cependant, l'utilisation réelle diffère nécessairement de l'utilisation prescrite (Perriault, 1989 ; Rabardel, 1995). Selon Rabardel (1995), lorsque l'utilisateur s'approprie un instrument, il lui confère des fonctions qui vont au-delà de leurs fonctions constitutives (genèse instrumentale). Ce faisant, il détourne l'instrument de sa fonction initiale. Ce détournement est une activité normale lorsqu'un utilisateur s'approprie un instrument. C'est pourquoi nous devons le prendre en compte lors de la conception de AMBRE en observant l'utilisation effective du logiciel en contexte.

La production de recommandations fondée sur des études sur l'apprentissage à partir d'exemple n'est donc pas suffisante pour garantir l'adéquation de l'EIAH AMBRE avec son objectif, l'apprentissage de méthodes. Ces recommandations doivent être adaptées au domaine d'application et aux utilisateurs. De plus, il est nécessaire de prendre en compte l'écart entre l'utilisation prescrite et l'utilisation effective de l'EIAH. Une évaluation du système auprès d'utilisateurs nous permettra d'évaluer cet écart et de mesurer l'impact du

logiciel sur l'apprentissage.

Chapitre 9 : Le logiciel Ambre-add

Les différentes recommandations produites ont été utilisées pour la conception du logiciel AMBRE-add, un logiciel destiné à l'apprentissage d'une méthode pour résoudre des problèmes additifs. Ce logiciel traite des problèmes proposés en primaire et plus particulièrement des problèmes étudiés en cycle 2 (classes de CE1-CE2).

De nombreuses études ont porté sur ces problèmes. Les études existantes en didactique des mathématiques nous ont permis d'expliciter la méthode que nous souhaitons faire acquérir dans cet EIAH.

Ce chapitre présente rapidement les recherches princeps qui portent sur ces problèmes puis décrit le logiciel AMBRE-add.

9.1. Études en didactique des mathématiques

Le domaine des problèmes additifs a été largement étudié en didactique des mathématiques, en psychologie cognitive et en linguistique (cf. Fayol, 1990, chapitre 6 pour une synthèse). Les problèmes additifs décrivent une situation concrète, par exemple un jeu de billes : « Alex avait 32 billes. À la fin de la récréation, il en a 45. Combien a-t-il gagné de billes pendant la récréation ? ». Certains problèmes sont résolus dès la maternelle, alors que d'autres posent encore des difficultés en fin de troisième (Marthe, 1982).

Riley, Greeno et Heller (1983) ont proposé une classification des problèmes additifs qui distingue trois catégories de problème : réunion, changement et comparaison.

- La catégorie « réunion » porte sur des situations statiques : « Jean a 3 billes. Pierre a 4 billes. Jean et Pierre ont ensemble 7 billes ». Les problèmes consistent à trouver le total ou un état partiel.
- La catégorie « changement » décrit une transformation appliquée à un état initial et aboutissant à un état final : « Jean avait 3 billes. Il en a gagné 4. Jean a maintenant 7 billes ». L'inconnue peut concerner l'état initial, la transformation (qui peut être additive ou soustractive) ou l'état final.
- La catégorie « comparaison » compare des quantités statiques à l'aide de formules du type « de plus que / de moins que » : « Jean a 3 billes. Pierre a 7 billes. Pierre a 4 billes de plus que Jean ». L'inconnue peut être la grande partie, la petite partie, ou la différence.

Greeno et Riley (1987) montrent que les difficultés que rencontrent les jeunes enfants en résolvant des problèmes additifs viennent essentiellement du fait qu'ils n'arrivent pas à se représenter correctement la situation décrite dans l'énoncé. Les enfants plus âgés sont

eux capables de bien résoudre les problèmes additifs car ils ont la capacité de modéliser les problèmes (Greeno et Riley 1987). Cette difficulté à modéliser les problèmes additifs vient en partie du fait que les enfants ne sont pas encore capables de maîtriser les outils que sont les équations et les entiers relatifs, outils que nous, adultes, utilisons pour modéliser ces problèmes.

La classification établie par Vergnaud (1982) précise la classification de Riley, Greeno et Heller. En distinguant le calcul numérique du calcul relationnel, il propose une approche plus opératoire pour modéliser les problèmes additifs. Cependant, lorsque l'on évalue les taux de réussite à ces problèmes, on remarque que la difficulté n'est pas liée à l'opération mathématique sous-jacente : une transformation négative n'est pas nécessairement plus difficile qu'une transformation positive. En revanche la catégorie du problème (réunion, changement ou comparaison) ainsi que la nature de l'inconnue interviennent dans la difficulté du problème. Les problèmes de la catégorie « changement » semblent plus faciles que ceux de la catégorie « réunion » ; les problèmes de comparaison sont les plus difficiles.

L'ensemble de ces travaux en didactique des mathématiques laisse à penser que le domaine des problèmes additifs est un bon domaine pour un EIAH AMBRE. En effet, il s'agit de problèmes difficiles pour les élèves de l'école primaire, dans lesquels la modélisation joue un rôle important, et pour lesquels une classification a été établie.

9.2. La méthode à acquérir

Dans le projet AMBRE, nous considérons qu'une méthode de résolution de problèmes est constituée d'une classification des problèmes et d'une classification des outils de résolution. La classification que l'on souhaite faire acquérir aux apprenants s'appuie sur la classification de Guin (Guin 1991) (inspirée des travaux de Vergnaud, 1985) que nous avons en partie reprise, et étendue aux problèmes de comparaison. La classification de problèmes est donc constituée de trois catégories principales : réunion, changement, comparaison. Chaque catégorie comprend plusieurs classes de problèmes qui diffèrent par la nature de l'inconnue, (ainsi que par la nature de l'opérateur pour les problèmes de changement). Selon cette classification il existe donc 11 classes de problèmes (Tableau 6) qui se différencient par la catégorie du problème, la nature de l'inconnue et l'opérateur.

Catégorie	Nature de l'inconnue	Opérateur
Changement	État initial	Ajouter
		Retraire
	Transformation	Ajouter
		Retraire
		Opérateur inconnu (augmentation)
		Opérateur inconnu (diminution)
	État final	Ajouter
		Retraire
Compréhension	Grande partie	
	Petite partie	
	Différence	
Résolution	Total	
	État partiel	

Tableau 6 : Classification de problèmes utilisée dans AMBRE-add

L'outil de résolution associé à un problème est l'équation qui représente le problème. D'après la classification établie par les didacticiens, une équation (par exemple $a + ? = b$) est associée à chaque classe de problèmes. Cette équation doit être instanciée au problème pour obtenir l'équation représentant le problème (par exemple $32 + ? = 45$). L'apprenant doit donc apprendre à écrire l'équation correspondant au problème.

« Alex avait 32 balles. A la fin de la récréation, il en a 45. Combien a-t-il gagné de balles pendant la récréation ? »

Pour un problème de ce type, la résolution proposée dans AMBRE-add est décomposée en plusieurs étapes :

Décrire le problème à l'aide d'une "opération à trous" : $32 - ? = 45$ (équation représentant le problème)

Écrire comment on effectue le calcul : $45 - 32 = ?$

Effectuer le calcul : 13

Écrire la réponse à la question : Alex a gagné 13 balles.

Figure 24 : Un exemple de problème additif et sa résolution

Le reste de la résolution (Figure 24) mobilise d'autres compétences relevant du calcul numérique. Nous considérons donc qu'elles sont en dehors de la méthode que nous souhaitons enseigner. Nous avons tout de même intégré ces étapes à l'EIAH AMBRE-add, afin de suivre le plan de résolution habituellement attendu des élèves.

En appliquant le principe du projet AMBRE à la méthode présentée ci-dessus, nous avons développé l'EIAH AMBRE-add. Cet EIAH guide l'apprenant au cours de la résolution de problèmes additifs en suivant le cycle AMBRE afin de l'aider à acquérir une classification des problèmes et des outils de résolution associés.

9.3. Description du logiciel AMBRE-add

Le logiciel AMBRE-add applique le principe de AMBRE au domaine des problèmes additifs et intègre un système d'aide et d'explication. Ce logiciel est destiné à être utilisé régulièrement par des élèves de CE1-CE2, de préférence en situation scolaire, en présence d'un enseignant ou d'un tuteur. Le vocabulaire utilisé dans le logiciel a été adapté pour des enfants de ce niveau.

Nous présentons ici cet EIAH du point de vue de l'apprenant en soulignant les différents choix de conception avant de présenter le diagnostic proposé par le système.

9.3.1. Présentation d'exemples résolus

Une séance de travail avec AMBRE-add commence par une présentation d'exemples résolus. Conformément aux recommandations, ces problèmes-types représentent chacun une classe de problèmes et ont tous des traits de surface identiques afin de favoriser la comparaison entre les exemples.

Chaque problème-type est présenté de manière séquentielle afin de favoriser un raisonnement anticipatif. L'énoncé est d'abord présenté avant la reformulation puis la résolution. Cette présentation séquentielle devrait favoriser la mise en œuvre d'un raisonnement anticipatif et de processus explicatifs pour s'expliquer le passage d'une étape à l'autre. Une fois que les différents problèmes-types ont été étudiés, le bilan présente tous les problèmes-types côte à côte afin de favoriser la comparaison entre problèmes.

9.3.2. Résolution de problèmes

Une fois les exemples présentés, les apprenants doivent résoudre des problèmes en étant guidés par les étapes du cycle AMBRE. Les problèmes sont choisis afin qu'un problème de chaque classe ayant des traits de surfaces proches des problèmes-types soit d'abord présenté avant de présenter des problèmes ayant des traits de surfaces plus éloignés.

REFORMULATION DES PROBLÈMES

Après avoir lu l'énoncé, l'apprenant doit reformuler le problème. Différentes études en didactique des mathématiques nous ont conduit à reformuler le problème en utilisant un

en vertu de la loi du droit d'auteur.

schéma (Figure 25). En effet, ces études montrent que l'utilisation de schémas pour représenter les différentes catégories de problèmes améliore les performances de résolution et de catégorisation de problèmes (Damm 1992 ; Fisher 1979 ; 1993 ; Vergnaud 1982 ; Willis et Fuson 1988). Pour les catégories "réunion" et "changement", nous avons adapté des schémas proposés dans les travaux cités ci-dessus. Pour la catégorie « comparaison », nous avons conçu un schéma au sein de l'équipe pluridisciplinaire (Jean-Daubias, 2004).

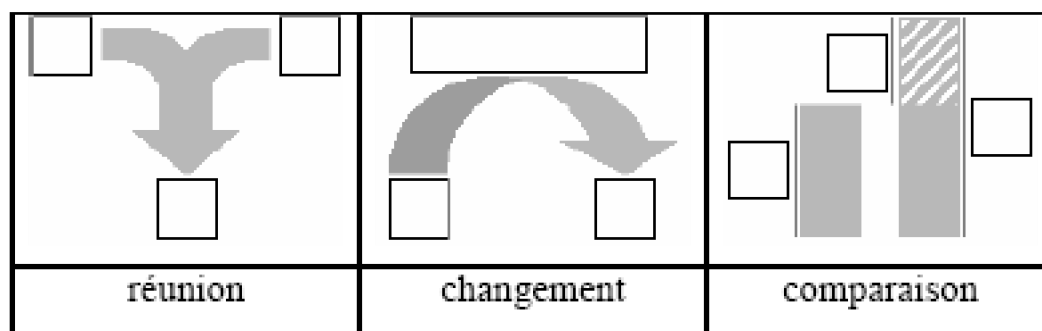


Figure 25 : Schémas représentant chaque catégorie de problèmes

Pour construire la reformulation du problème à résoudre, l'apprenant doit donc choisir l'un des schémas représentant les trois catégories de problèmes, indiquer la place de l'inconnue par un point d'interrogation et enfin compléter cette reformulation par les valeurs déjà connues (et l'opérateur pour les problèmes de changement). L'annexe 1 présente les différentes classes de problèmes sous forme de schéma complétés. L'objectif de cette étape de reformulation (Figure 26) est que l'apprenant soit progressivement capable d'identifier les éléments pertinents pour la résolution. Cette reformulation devient une référence pour la suite de la résolution.

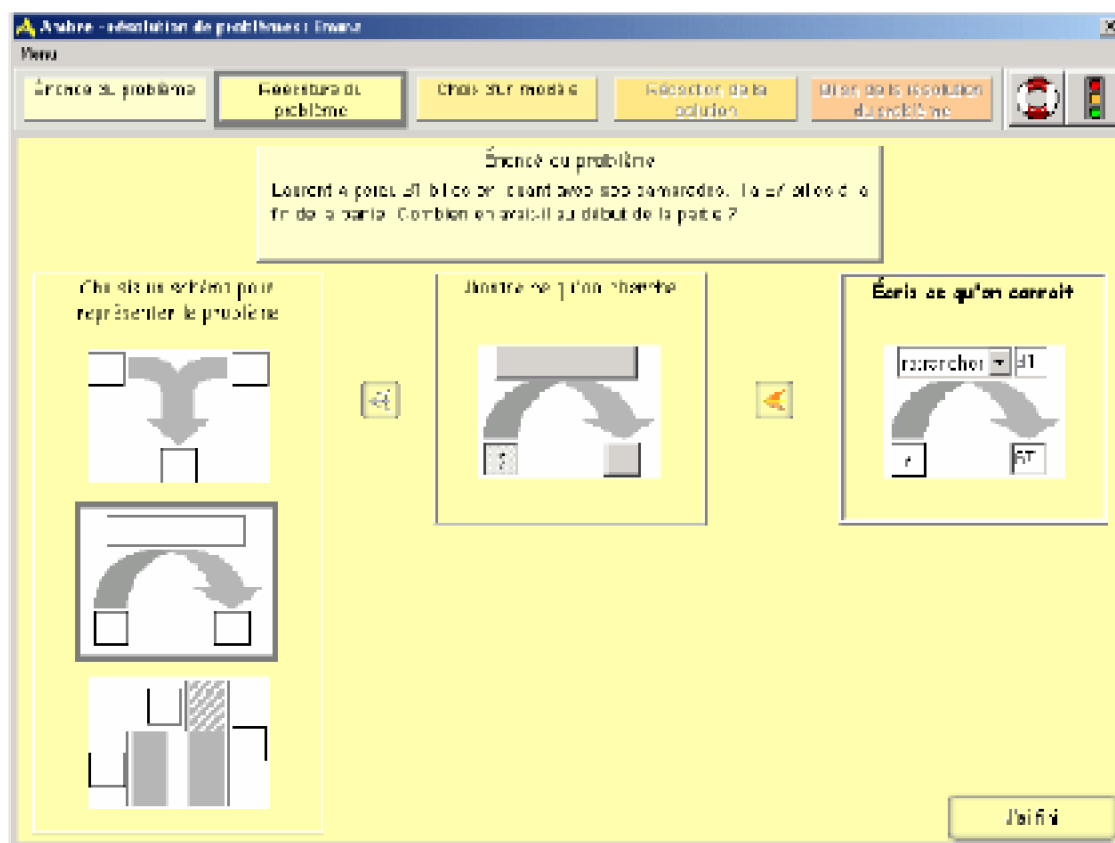


Figure 26 : Etape de reformulation du problème

CHOIX D'UN PROBLÈME-TYPE

L'apprenant doit ensuite comparer le problème aux différents problèmes-types afin de choisir celui qui est le plus proche du problème à résoudre. Dans cette étape, la consigne incite les élèves à comparer le problème à résoudre aux différents problèmes-types que l'apprenant a déjà vus (en début de séance et pendant les séances précédentes). Ceux-ci sont représentés par leur énoncé et leur reformulation (Figure 27). Si l'apprenant éprouve des difficultés à faire cette comparaison, il peut faire appel à l'aide. Le système facilite alors la comparaison en colorant en vert les éléments identiques entre les problèmes et en rouge les éléments différents. A travers cette activité de comparaison, l'on souhaite accentuer la généralisation de connaissances.

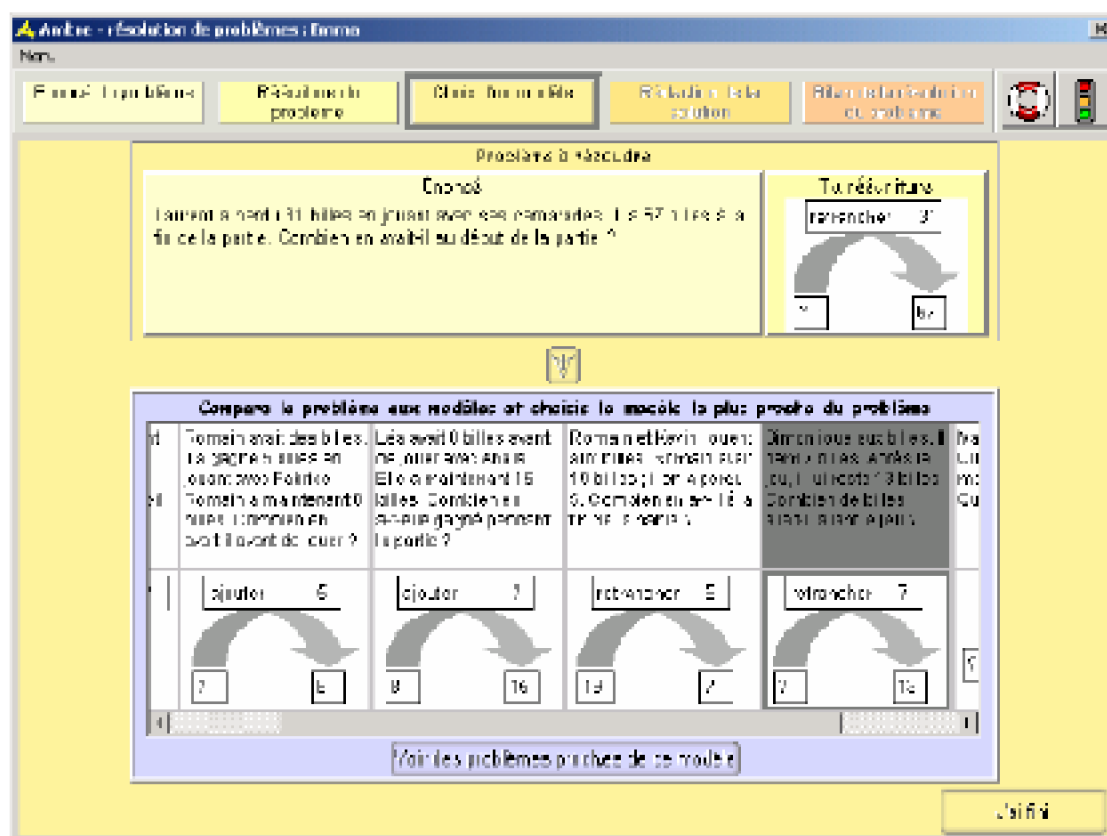


Figure 27 : Etape de choix d'un problème-type

ADAPTATION DU PROBLÈME-TYPE

L'étape suivante consiste pour l'apprenant à rédiger la solution du problème en s'aidant du problème-type qu'il a choisi dans l'étape précédente (cf. Figure 28 : problème-type à gauche, problème à droite). Comme nous l'avons vu précédemment, la résolution se décompose en plusieurs sous-étapes. L'apprenant doit d'abord écrire l'équation qui correspond au problème. Ensuite, il doit écrire l'opération à réaliser pour aboutir à la solution, puis effectuer le calcul. Enfin il doit écrire la phrase de réponse à l'aide de listes déroulantes. Pour faciliter la mise en correspondance du problème-type avec le problème à résoudre, une fonctionnalité du système permet de colorier les éléments de l'énoncé, de la reformulation et de la solution qui ont une fonction identique ou qui sont liés. De plus, la sous-étape du problème-type correspondant à la sous-étape traitée par l'apprenant est accentuée par une police en gras. Nous supposons que l'adaptation de la résolution du problème-type choisi au problème à résoudre est source de généralisation.

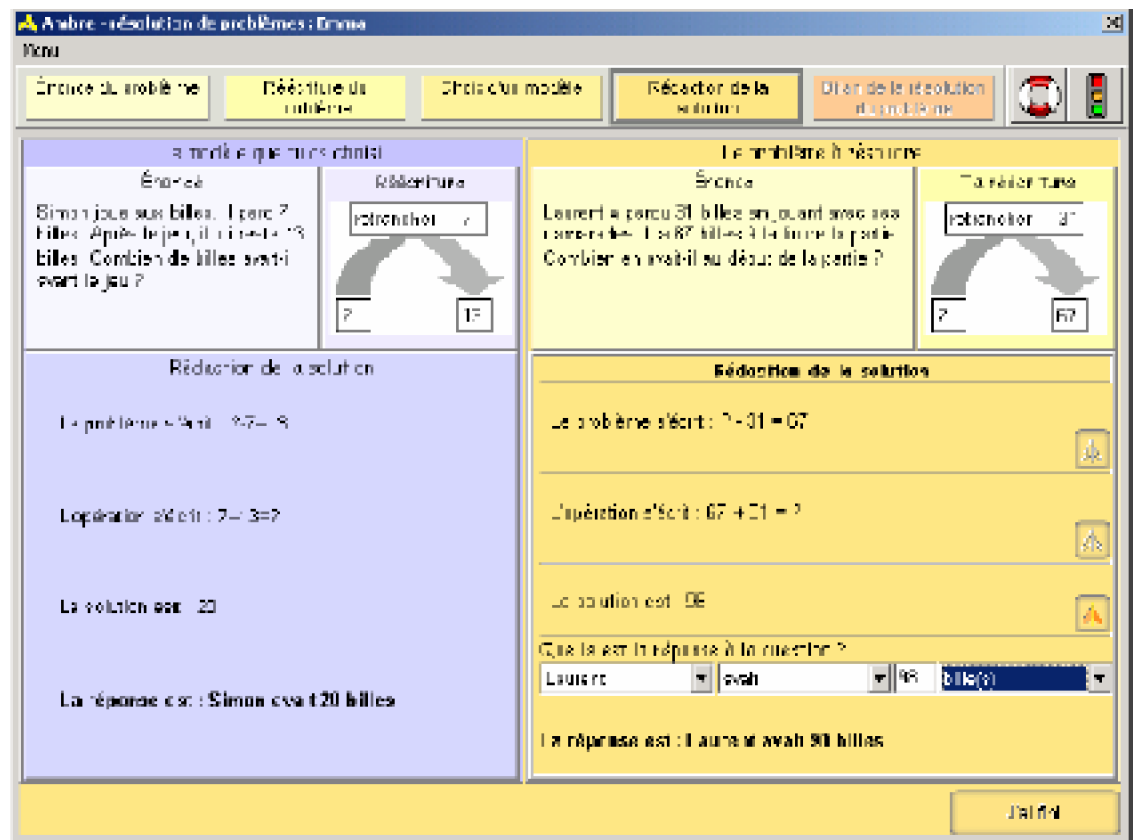


Figure 28 : Etape d'adaptation

CLASSEMENT DU PROBLÈME RÉSOLU

Enfin, dans la dernière étape, le système présente d'abord à l'apprenant un bilan de la résolution du problème : l'énoncé, sa reformulation et la solution. Ensuite l'apprenant est invité à ranger ce problème avec l'un des modèles, afin de constituer des groupes de problèmes de même classe (Figure 29). Ce faisant, l'apprenant identifie la classe à laquelle appartient le problème. AMBRE-add ne propose pas d'activité de réorganisation, ceci afin de ne pas augmenter la complexité du système prévu pour des utilisateurs jeunes.

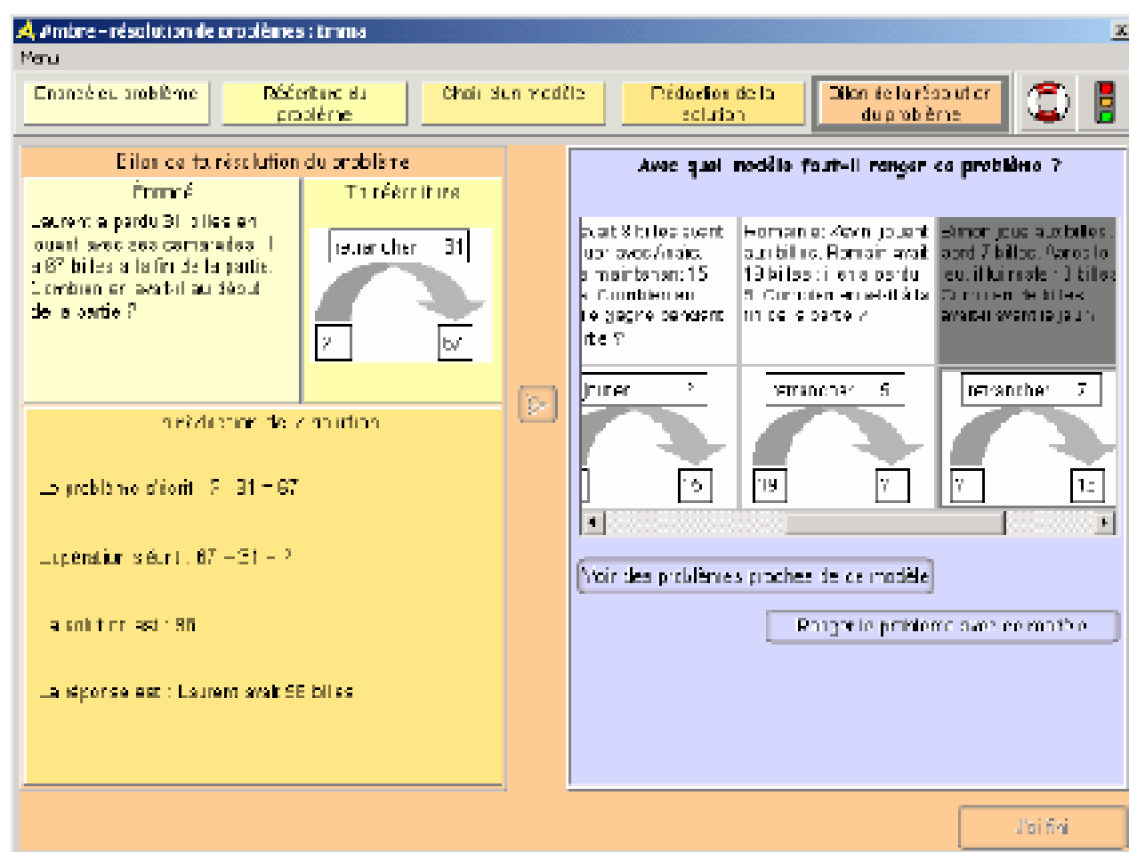


Figure 29 : Etape de classement

9.3.3. Aide et Diagnostic

Un système d'aide et de diagnostic, est intégré à ce logiciel (Duclosson, 2004) afin d'aider l'apprenant à prendre conscience de ses erreurs et de l'aider à y remédier. Ce système propose des explications de différentes natures en fonction des erreurs commises par l'élève (Duclosson, 2004). Un diagnostic automatique peut être fait après chaque sous-étape ou à la fin de chaque étape suivant le paramétrage choisi (par exemple par l'enseignant). Un paramétrage par défaut propose un diagnostic à la fin de chaque étape.

Les apprenants peuvent également faire appel eux-mêmes au diagnostic pour évaluer leur réponse en cliquant sur un feu tricolore. Le système de diagnostic est alors activé et des explications sont proposées si l'élève a commis une erreur. En complément, un système d'aide consultable à la demande donne des indications à l'apprenant sur l'action à réaliser. Cette aide peut parfois renvoyer l'apprenant vers une page de présentation des différents schémas ou vers des fonctionnalités qui peuvent lui être utiles (par exemple une calculatrice simplifiée).

Comme cet EIAH comprend plusieurs étapes comportant chacune une consigne différente, il nous est apparu nécessaire de prévoir une séance pour découvrir et prendre en main le logiciel. Pour faciliter cette prise en main, nous avons préparé un tutoriel qui décrit le fonctionnement général du logiciel, le rôle de chaque étape, et présente les différents schémas utilisés.

9.4. Bilan

Nous avons choisi de concevoir un EIAH AMBRE dans le domaine des problèmes additifs. En effet, ce domaine pose des difficultés liées à la modélisation de la situation. Pour dépasser ces difficultés nous proposons de faire acquérir une méthode construite à partir d'études en didactique des mathématiques.

Cet EIAH, AMBRE-add, a été conçu suivant le principe de AMBRE (présentation d'exemples puis résolution de problèmes suivant le cycle AMBRE) et en appliquant les recommandations générales présentées dans le chapitre précédent. Ainsi, les problèmes-types sont présentés de manière séquentielle. De plus, la présentation des problèmes-types est suivie par un bilan qui permet de les comparer. Lors de l'étape de choix d'un problème-type, la consigne a été adaptée pour favoriser la comparaison. Dans cette étape, les problèmes-types sont représentés à la fois par leur énoncé et la reformulation. Des fonctionnalités destinées à faciliter la comparaison entre problèmes ont été incluses dans le logiciel. Ainsi, un outil permet de voir les similarités et les différences entre le problème à résoudre et un problème-type dans l'étape de choix. Dans l'étape d'adaptation, un outil d'aide colorie les éléments du problème-type et du problème à résoudre qui ont des fonctions similaires. Par ailleurs, le diagnostic peut être consulté à la demande et est totalement paramétrable. Un paramétrage par défaut qui suit les recommandations est proposé.

Dans les recommandations, nous avons proposé d'ajouter une étape de réorganisation dans le but de permettre à l'apprenant de réorganiser les classes de problèmes rencontrées et éventuellement de créer de regrouper différentes classes de problèmes. Néanmoins, nous avons choisi de ne pas présenter cette étape de réorganisation dans le logiciel AMBRE-add ; nous avons jugé cette étape trop complexe pour des enfants de CE1-CE2.

Enfin, nous avons utilisé les recommandations pour choisir une séquence de problèmes-types et de problèmes à résoudre suivant leur classe et leurs traits de surface. Ces recommandations ont ainsi orienté la conception de l'interface et des différentes fonctionnalités du système ainsi que le choix des problèmes.

Une fois implémenté, cet EIAH a été évalué. Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'évaluation d'un EIAH pose des problèmes en partie différents de l'évaluation d'un autre type de système informatique. Le chapitre suivant présente les spécificités de ces systèmes et les différentes méthodes d'évaluations possibles pour un tel système.

Chapitre 10 : Comment évaluer un EIAH ?

De nombreuses méthodes destinées à évaluer les systèmes informatiques existent. Ces méthodes permettent d'évaluer différents aspects d'un système. Senach (1993) distingue

deux facettes particulièrement importantes : l'utilisabilité d'un système informatique (la facilité d'utilisation du système) et son utilité (l'adéquation du logiciel aux objectifs de haut niveau).

Pour choisir les méthodes appropriées à l'évaluation des EIAH suivant ces deux facettes, il est nécessaire de prendre en compte certaines des spécificités des EIAH. La première concerne leur objectif de haut niveau : faciliter l'apprentissage. Cet objectif peut différer de la tâche que doit accomplir l'apprenant (l'objectif à court terme). La seconde spécificité est liée aux utilisateurs. Il faut en effet distinguer deux types d'utilisateurs : les apprenants et les enseignants. Si les apprenants sont clairement les utilisateurs finaux principaux de ces systèmes, les enseignants en sont prescripteurs, au sens où ce sont généralement eux qui provoquent l'utilisation par les apprenants d'un EIAH donné, mais également utilisateurs secondaires (Dubourg et Deutsch, 1997 ; Jean, 2000) du fait qu'ils peuvent parfois préparer le travail de leurs apprenants en paramétrant le système. Par ailleurs, les situations d'utilisation des EIAH peuvent être très variées. Ces systèmes peuvent être utilisés seuls ou en binôme, à la maison, en salle informatique avec l'enseignant ou en salle de classe en autonomie pendant que les autres élèves effectuent d'autres activités. L'utilisation du système peut être extrêmement ponctuelle (utilisation unique) ou régulière pendant une période de l'année (par exemple une utilisation par semaine pendant trois mois). Or la situation d'utilisation d'un EIAH a un impact sur l'apprentissage. Il est donc nécessaire de prendre en compte cette situation lors de l'évaluation de l'apprentissage.

Suivant ces spécificités, les méthodes d'évaluation de l'utilisabilité doivent être adaptées aux EIAH (Hû et Trigano, 1998 ; Jean, 2000) et les méthodes d'évaluation de l'utilité doivent être spécifiques à l'objectif de haut niveau de ces systèmes : l'apprentissage.

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art des méthodes qui peuvent être utilisées pour évaluer l'utilisabilité et l'utilité d'un EIAH. Nous décrirons d'abord les techniques qui permettent d'évaluer l'utilisabilité d'un système informatique, ainsi que la manière de les adapter pour évaluer un EIAH. Puis nous présenterons différentes méthodes permettant d'évaluer l'apprentissage.

10.1. Évaluer l'utilisabilité

Il convient d'abord d'évaluer l'utilisabilité d'un système. L'utilisabilité concerne l'adéquation entre la manière dont une tâche est réalisée par un utilisateur et les capacités cognitives de cet utilisateur (Farenc, 1997). D'après la définition ISO 9241-11, un logiciel est utilisable lorsque l'utilisateur peut réaliser sa tâche (efficacité), qu'il consomme un minimum de ressources pour le faire (efficience) et que le système est agréable à utiliser (satisfaction de l'utilisateur).

10.1.1. Méthodes d'évaluation de l'utilisabilité

Il existe de nombreuses méthodes permettant de mesurer l'utilisabilité. Pour présenter ces méthodes, nous reprenons la distinction proposée par Senach (1993) entre évaluation

analytique et évaluation empirique. Ensuite nous présenterons les spécificités liées à l'évaluation de l'utilisabilité d'un EIAH.

ÉVALUATION ANALYTIQUE

L'évaluation analytique consiste à étudier les interfaces selon un ensemble de référents afin de contrôler qu'elles possèdent bien certaines qualités et de détecter les problèmes qu'elles peuvent poser. Il existe plusieurs manières de conduire une évaluation analytique. Cette évaluation peut être faite par des experts s'appuyant sur des listes de critères conçues par des ergonomes (Bastien et Scapin, 1993 ; Nielsen, 1993 ; Lewis et al., 1990). Ainsi Nielsen (1993) et Schneiderman (1992) distinguent cinq attributs de l'utilisabilité :

- l'apprentissage (de l'utilisation du système),
- l'efficacité (la facilité à réaliser la tâche souhaitée),
- la mémorisation (la capacité à reprendre en main rapidement le système lors d'utilisations espacées),
- les erreurs (liées à l'utilisation du logiciel),
- la satisfaction subjective de l'utilisateur.

Bastien et Scapin (1993) proposent, eux, huit critères ergonomiques pour l'évaluation des interfaces (qui recoupent parfois les attributs présentés précédemment). Citons pour exemple le critère de gestion des erreurs : « Le critère gestion des erreurs concerne tous les moyens permettant d'une part d'éviter ou de réduire les erreurs, et d'autre part de les corriger lorsqu'elles surviennent. Les erreurs sont ici considérées comme des saisies de données incorrectes, des saisies dans des formats inadéquats, des saisies de commandes avec syntaxe incorrecte, etc. Trois sous-critères participent à la gestion des erreurs : protection contre les erreurs, qualité des messages d'erreurs et correction des erreurs. » (Bastien et Scapin, 1993).

Pour faciliter l'évaluation analytique, il existe également des check-lists qui permettent de vérifier point par point que le logiciel est conforme à un certain nombre de critères.

Une autre méthode d'évaluation analytique consiste à spécifier des tâches et des séquences d'actions dans le logiciel et à imaginer ce que ferait l'utilisateur dans ces situations. Ces inspections cognitives (cognitive walkthroughs) (Lewis et al., 1990) permettent ainsi de s'assurer que le système peut réaliser les actions souhaitées et d'identifier quels problèmes peuvent se poser.

ÉVALUATION EMPIRIQUE

L'évaluation empirique consiste à recueillir des données relatives au comportement de l'utilisateur lors de l'utilisation du système. Ce type d'évaluation nécessite l'existence d'un système réel (maquette, prototype ou système final) et la présence d'utilisateurs. L'utilisation qui est faite du système par ces utilisateurs est observée et analysée. Une

observation individuelle détaillée de l'interaction entre l'utilisateur et le système permet d'identifier les capacités de l'utilisateur, de détecter les difficultés éventuelles, ou encore de noter les caractéristiques inattendues de la situation (Gagné, Briggs et Wager, 1988). Nielsen indique qu'un panel de cinq utilisateurs « représentatifs » permet d'identifier 80% des problèmes (Nielsen et Landauer, 1993). Ces techniques d'observation peuvent être complétées par des techniques d'entretien ou par un questionnaire afin d'avoir des indications sur la compréhension ou la satisfaction de l'utilisateur.

10.1.2. Utilisabilité et EIAH

Ces différentes méthodes doivent être adaptées aux EIAH. En ce qui concerne l'évaluation analytique, il est possible d'utiliser les attributs et critères ergonomiques pour évaluer l'utilisabilité des EIAH (Squires et Preece, 1999), mais ceux-ci doivent parfois être adaptés en fonction de l'objectif pédagogique du logiciel, des utilisateurs des EIAH et de la tâche. Ainsi, lorsque l'objectif de haut niveau (l'apprentissage) diffère de l'objectif à court terme de l'utilisateur, la définition de certains critères tels que l'efficacité doivent être reconsidérés : dans un EIAH ayant pour objectif à court terme la résolution de problèmes, on peut privilégier un parcours tortueux du point de vue de la résolution de problèmes, plus bénéfique pour l'apprentissage, même s'il est perçu comme moins efficace qu'un parcours linéaire. D'autres critères doivent être précisés : par exemple l'application du critère de gestion des erreurs (Bastien et Scapin, 1993) aux EIAH nécessite de faire la distinction entre deux types d'erreurs : les erreurs dans l'utilisation du logiciel et les erreurs au sens de réponses erronées (erreurs conceptuelles) (Jean, 2000). Si les erreurs d'utilisation du logiciel doivent être empêchées ou corrigées, suivant ainsi la recommandation de Bastien et Scapin, la gestion des erreurs conceptuelles doit être traitée indépendamment en fonction de la théorie cognitive sous-jacente à l'EIAH. Ainsi, dans une perspective behavioriste, on choisira de corriger immédiatement chaque erreur, tandis que dans d'autres perspectives on pourra laisser l'apprenant se rendre compte lui-même de ses erreurs.

Les autres méthodes d'évaluation analytique présentées sont plus difficiles à adapter à des systèmes laissant de nombreux degrés de liberté tels que les EIAH. L'utilisation de check-lists semble être peu adaptée (Squires et Preece, 1999) du fait qu'elles ne prennent pas en compte le contexte d'utilisation réel du logiciel, contexte particulièrement important en EIAH. L'utilisation des « inspections cognitives » peut être envisagée, mais seulement pour certains types d'EIAH. En effet, cette méthode demande souvent une modélisation très détaillée de la tâche, ce qui est réalisable pour des environnements d'apprentissage qui favorisent le développement de compétences très précises, mais pas pour des environnements qui permettent une certaine créativité ou qui peuvent être employés de manières différentes suivant les apprenants.

Les méthodes d'évaluation empiriques sont plus flexibles et semblent plus appropriées aux EIAH dans la mesure où les utilisateurs observés sont représentatifs des apprenants qui utiliseront ensuite le système. Les méthodes classiques d'observations et d'entretiens peuvent donc être utilisées. Par ailleurs, il peut être intéressant de conduire ces observations dans le contexte d'utilisation envisagé pour le logiciel afin de déterminer si les apprenants ont le comportement et les résultats escomptés dans des conditions

proches de la réalité (Hoecker et Elias, 1986).

10.2. Évaluer l'utilité

Après l'évaluation de l'utilisabilité, il est nécessaire d'évaluer l'utilité du système. Rappelons que l'utilité est l'adéquation entre les fonctions fournies par le système et celles nécessaires à l'utilisateur pour atteindre les objectifs de haut niveau pour lequel a été conçu le système.

Classiquement, l'évaluation de l'utilité consiste à observer si l'utilisateur est capable d'accomplir sa tâche à partir des fonctionnalités du système. Pour cela, il est nécessaire de bien formaliser la tâche que l'utilisateur doit accomplir.

Dans le cadre des EIAH, l'objectif à atteindre comporte deux niveaux : l'apprentissage (de la discipline enseignée et non de la manipulation du système) et la réalisation de tâches proposées par le système (résolution de problèmes, recherche d'informations, simulations...) (Jean, 2000). Même si ces niveaux sont connectés, il n'y a pas de lien direct entre la réalisation de la tâche et l'apprentissage effectif, un échec dans la réalisation de la tâche pouvant, dans certaines conditions, être bénéfique pour l'apprentissage. Évaluer l'utilité d'un EIAH ne consiste donc pas seulement à vérifier que l'utilisateur peut réaliser la tâche qu'il souhaite accomplir (ce qui peut se faire selon les méthodes classiques de mesure de l'utilité), mais aussi à évaluer l'objectif de plus haut niveau qu'est l'apprentissage.

Il existe de nombreuses méthodes pour évaluer l'apprentissage. Ces méthodes, issues de techniques non spécifiques aux EIAH, peuvent être adaptées pour évaluer de tels systèmes. Elles peuvent permettre de quantifier l'impact de l'EIAH sur l'apprentissage, d'informer sur l'activité de l'apprenant durant l'utilisation de l'EIAH ou encore de prendre en compte la situation dans laquelle se déroule l'apprentissage. Nous proposons une rapide description de ces différentes méthodes.

La **méthode comparative**, développée par la psychologie cognitive, est souvent utilisée pour évaluer les EIAH. Elle consiste à comparer l'effet de plusieurs situations sur l'apprentissage qui en résulte. Shute et Regian (1993) présentent en détail l'application de cette méthode aux EIAH. Tricot et Lafontaine (2002) en rappellent le principe général : « prescrire une tâche en rapport avec l'apprentissage visé pour évaluer l'état des connaissances du participant ; faire ensuite apprendre à l'apprenant ce que l'on veut lui faire apprendre [dans notre cas, au travers de l'utilisation de l'EIAH] prescrire enfin une seconde tâche, analogue à la première. S'il y a une différence positive de performance entre les deux tâches, on considère alors que le sujet a appris quelque chose. » Pour vérifier que la différence obtenue est bien due à l'utilisation de l'EIAH, on utilise généralement une condition contrôle dans laquelle les participants font « exactement la même chose » (même consigne, même environnement, mêmes contenus, etc.) sauf ce qui est évalué. La difficulté réside dans le choix de la condition contrôle : faut-il comparer l'EIAH à un enseignement oral ? À un autre système ? À une version tronquée de l'EIAH testé ? Malgré cette difficulté, cette méthode permet d'observer le résultat d'un changement dû au système et d'inférer les connaissances acquises par l'apprenant avec

un certain degré de généralité.

Toutefois, cette méthode ne permet pas de comprendre ce qui se passe au cours de l'apprentissage ou au cours de l'utilisation du dispositif de formation. Or pour comprendre et interpréter les résultats obtenus avec la méthode comparative, il peut être important de savoir ce qu'a fait l'apprenant durant l'utilisation du logiciel. Des **méthodes « on-line »** (Rouet et Passerault, 1999) permettent d'identifier l'activité de l'apprenant au cours de l'utilisation du logiciel. Certaines méthodes (telles que le paradigme de double tâche) issues de recherches en compréhension de texte, permettent d'identifier sur quels éléments l'apprenant a focalisé son attention. D'autres méthodes permettent de mieux comprendre les processus d'apprentissage mis en œuvre. Ainsi, le **recueil des verbalisations** (Caverni, 1988), qui consiste à demander à l'apprenant de penser à haute voix durant l'activité proposée, permet d'identifier les raisonnements qu'il peut mettre en œuvre pour la réaliser. Cette méthode est très utilisée dans de nombreuses études anglo-saxonnes sur l'apprentissage. Cependant elle a certaines limites : l'activité de verbalisation peut interférer avec la tâche principale, et les verbalisations recueillies reflètent une interprétation du raisonnement de l'apprenant plutôt que le raisonnement lui-même.

La collecte de documents et de traces d'interactions peut compléter les informations verbales. Lors de l'utilisation d'un logiciel, un grand nombre de documents sont produits (productions informatisées des élèves, productions écrites comme les brouillons). Il peut être intéressant de les analyser, par exemple pour confirmer une interprétation. Les traces d'interaction entre l'apprenant et le système sont également une source d'informations précieuses. Si elles se résument parfois aux productions de l'élève, elles sont souvent beaucoup plus riches et diversifiées (frappe du clavier, clic, déplacement de la souris, utilisation des menus et fonctionnalités, dialogues...). Tous ces éléments ne sont pas nécessairement pertinents ; ces traces brutes doivent ensuite être interprétées. Ainsi, Dubourg, Delozanne et Grugeon (1995) considèrent les événements-système tels que les clics et les frappes au clavier comme des observables de trop bas niveau pour étudier l'interaction. Ils définissent donc les événements-logiciel (menu, fonction activée) comme des séquences d'événements-système correspondant à une action significative pour la situation d'interaction. Selon Balacheff (1994 b), la succession des événements-logiciel recueillis au cours d'une session définit le modèle comportemental de l'apprenant. Une interprétation de ce modèle permet de construire le modèle épistémique dont le rôle est d'attribuer une signification aux comportements de l'apprenant en identifiant ses buts, stratégies et connaissances. Toute la difficulté réside ici dans l'interprétation des traces. Champin, Prié et Mille (2004) proposent une autre alternative pour analyser les traces d'interaction : le modèle MUsETTE. Ce modèle propose que la trace d'utilisation recueillie soit conforme à un modèle d'utilisation préalablement défini décrivant les objets et les relations manipulés par l'utilisateur du système informatique. La trace primitive ainsi construite peut ensuite être analysée *a posteriori* en recherchant des séquences définies par l'expérimentateur correspondant à des épisodes d'apprentissage significatifs.

En complément de ces méthodes, les **méthodes ethnographiques** permettent de prendre en compte la situation dans laquelle l'apprentissage se déroule. Ces méthodes

consistent à observer une situation « de l'intérieur ». L'observateur fait parti de la situation qu'il observe, il est pleinement conscient de la subjectivité de sa situation et adopte donc une position réflexive sur sa pratique d'observation. Pour l'évaluation des EIAH, l'observation peut porter sur un apprenant, un groupe d'apprenants ou une classe entière (Barfurth et al., 1994). L'observation individuelle apporte des informations intéressantes et diverses permettant de comprendre les interactions entre l'apprenant et le système, en décrivant les fonctionnalités utilisées, les difficultés rencontrées, les stratégies adoptées ou encore la motivation de l'apprenant. L'observation d'apprenants qui travaillent en groupes peut donner des informations sur leurs interactions avec le système ainsi que sur les connaissances qu'ils élaborent à travers leurs interactions (Gilly, Roux et Trognon, 1999). L'observation d'une classe dans son ensemble peut permettre d'identifier son fonctionnement et peut aider à mettre en évidence les caractéristiques de l'enseignement (Fasse et Kolodner, 2000). L'observation peut être facilitée par le recours à des instruments d'observation (grilles d'observation, eye-tracking) (Fasse et Kolodner, 2000 ; Barfurth et al. 1994, Rouet et Passerault, 1999) et à des instruments d'enregistrement (vidéo) afin de faire *a posteriori* une analyse plus fine de la situation. En complément des observations, la tenue d'un journal de bord peut augmenter la fiabilité des observations en intégrant le point de vue subjectif et réflexif de l'observateur (Barfurth et al., 1994).

Les données issues de l'observation peuvent être complétées par des **entrevues** individuelles ou collectives avec les apprenants. Les entretiens peuvent être ouverts (les thèmes abordés varient en fonction du participant), structurés (les questions sont prédéfinies) ou semi structurés (les questions à poser sont prédéfinies, mais une place est laissée pour des réponses plus individualisées). Les réponses et les remarques des apprenants collectées durant l'entretien peuvent éclairer l'interprétation de résultats obtenus par d'autres méthodes, permettre de comprendre le cheminement interne de l'apprenant ou donner des indications sur le degré de conscience de l'apprenant face à son apprentissage. Dans le cadre d'une évaluation en classe, il peut être utile de faire en complément des entretiens avec les enseignants pour confronter les différents points de vue sur le déroulement de l'évaluation (Barfurth et al., 1994).

10.3. Bilan

En résumé, de nombreuses méthodes permettent d'évaluer l'utilisabilité et l'utilité d'un système, mais toutes ne sont pas appropriées à l'évaluation des EIAH. L'évaluation de l'utilisabilité d'un EIAH peut se faire en adaptant les techniques classiques développées dans le domaine de l'interface homme-machine (IHM) aux spécificités des EIAH. L'évaluation de l'utilité d'un EIAH ne peut être faite à l'aide des techniques classiques développées en IHM. En effet, l'objectif d'un EIAH étant de favoriser l'apprentissage, les méthodes utilisées doivent être adaptées à cet objectif. Ainsi, les méthodes développées en psychologie cognitive et en sciences humaines semblent particulièrement adaptées pour mesurer l'impact d'un EIAH sur l'apprentissage et les conditions qui favorisent ou non cet apprentissage.

Chapitre 11 : Évaluation du logiciel Ambre-add

Pour évaluer l'utilisabilité et l'utilité de AMBRE-add nous avons conduit plusieurs expériences combinant différentes méthodes présentées dans le chapitre précédent.

Nous avons d'abord réalisé une première expérience qui consistait à observer cinq enfants individuellement afin de déceler les difficultés rencontrées par les enfants et d'identifier les principaux problèmes d'utilisabilité.

Ensuite nous avons réalisé une seconde expérience afin d'évaluer l'utilité du logiciel, c'est-à-dire son impact sur l'apprentissage. Nous avons adopté une méthode comparative en comparant AMBRE-add avec deux maquettes contrôle. Nous avons réalisé cette expérience dans une situation « réelle » d'utilisation, dans une école avec trois classes d'élèves en CE1. Pour prendre en compte les caractéristiques de la situation d'utilisation, nous avons complété cette expérience en mettant en oeuvre différentes méthodes qualitatives (observation, entretiens, questionnaire). Finalement nous avons réalisé une expérience pilote avec des élèves de CE2.

Nous présentons ici ces différentes expériences et leurs résultats.

11.1. Evaluation du logiciel en laboratoire

Nous avons d'abord évalué l'EIAH AMBRE-add lors d'une pré-expérimentation en laboratoire afin de vérifier que le système était utilisable par des élèves de cycle 2 et afin d'identifier les problèmes posés par le système.

En concertation avec les enseignants et la conseillère pédagogique qui sont intervenus dans le projet, nous avons plus particulièrement choisi de tester le logiciel auprès d'élèves en classe de CE1 car les problèmes additifs à une étape, présentés par le logiciel, font l'objet d'une partie importante du programme de mathématiques cette année là, et sont plus particulièrement traités au second semestre de l'année, durant la période où nous avons évalué le logiciel.

Pour tester l'utilisabilité du système et identifier les différents problèmes qu'il pourrait soulever, nous avons réalisé une observation individuelle de cinq élèves de CE1 utilisant l'EIAH. Nous avons complété cette observation par un questionnaire afin de récolter des informations sur les utilisateurs telles que leur goût pour les mathématiques ou leur familiarité avec un ordinateur, et afin de connaître leur satisfaction.

Pour définir des critères d'observation qui permettent d'évaluer l'utilisabilité de AMBRE-add, nous avons choisi sept critères parmi les critères ergonomiques proposés par Bastien et Scapin (1993), Nielsen (1993) et Schneiderman (1992) :

- **La prise en main du logiciel** : est-ce que les apprenants comprennent comment utiliser le logiciel ? Est ce qu'il est pris en main facilement ?

- **La compréhension générale** : est-ce que les utilisateurs comprennent le principe de l'EIAH (par exemple les différentes étapes à suivre pour résoudre un problème, le lien entre les étapes) ?
- **L'efficacité** : est-ce que la tâche (ici la résolution de problème) peut être accomplie facilement avec le logiciel ? Est-ce que certains éléments de l'interface conduisent à des erreurs systématiques qui entravent la réalisation de la tâche ?
- **La gestion des erreurs** : y a-t-il des problèmes ergonomiques qui conduisent à des erreurs d'utilisation du système ? Est-ce que les utilisateurs comprennent leurs erreurs ? Comment réagissent-ils aux messages fournis par l'EIAH ?
- **La gestion de l'aide** : est-ce que les utilisateurs utilisent l'aide proposée ? Compréhendent-ils les messages d'aide ?
- **La surcharge cognitive** : y a-t-il des étapes qui entraînent une surcharge cognitive ?
- **La satisfaction** : le logiciel est-il facile et agréable à utiliser ?

A partir de ces critères, des observables ont été définis (la liste complète est présentée annexe 8).

11.1.1. Méthode

Cinq enfants, âgés de 7 ans, élèves en classe de CE1, ont été observés. Pour des raisons pratiques, trois enfants ont été observés au laboratoire tandis que deux enfants ont été observés chez eux.

Le matériel utilisé pour l'expérience se composait d'un ordinateur portable (et de sa souris) sur lequel était installé AMBRE-add, d'une caméra, d'un magnétophone, d'un chronomètre, d'une fiche d'observation et d'un questionnaire (Annexe 9). Lorsque l'expérience se déroulait au laboratoire, toute la séance était filmée par une caméra numérique pointée sur l'écran. Lorsque la séance se déroulait à domicile, les échanges verbaux étaient enregistrés sur magnétophone.

Au cours de cette expérience, les enfants utilisaient le logiciel puis répondaient au questionnaire. Après que l'enfant se soit installé devant l'ordinateur, l'expérimentatrice lui présentait brièvement l'objectif du logiciel : « résoudre des problèmes d'addition et de soustraction en suivant les étapes du logiciel » et le principe général, étudier des exemples puis résoudre des problèmes. Ensuite, l'enfant pouvait utiliser seul le logiciel. Pour la première utilisation, avant de présenter les exemples et la résolution de problèmes, le logiciel proposait d'abord plusieurs écrans qui présentaient le fonctionnement du logiciel et les schémas utilisés.

Durant l'utilisation du système, l'observateur, positionné en retrait derrière l'utilisateur, observait l'interaction de l'utilisateur avec le logiciel et notait sur une fiche d'observation (Annexe 11) les temps passés sur chaque étape ou sous-étape du logiciel, les difficultés rencontrées au cours de l'utilisation du logiciel, les gestes et comportements non verbaux de l'utilisateur ainsi que ses remarques et questions (cf. liste des observables, Annexe 8). Si l'utilisateur posait des questions sur le fonctionnement du logiciel, l'expérimentateur le renvoyait vers l'aide. Toutefois, si l'aide n'était pas suffisante, l'expérimentateur lui donnait

les indications nécessaires pour poursuivre. S'il restait bloqué ou éprouvait de grandes difficultés, l'expérimentateur pouvait intervenir spontanément pour le débloquent. La séance s'arrêtait lorsque l'enfant avait résolu au moins un problème avec le logiciel.

Après la phase d'utilisation, les questions issues du questionnaire (Annexe 8) étaient posées par l'expérimentatrice sous la forme d'un entretien directif afin que les réponses ne soient pas perturbées par les éventuelles difficultés d'écriture.

Il est à noter que l'un des enfants a utilisé le logiciel durant deux autres séances. Même si elles ne sont pas généralisables, ces observations complémentaires ont donné des indications sur les difficultés éventuelles liées à la reprise en main du logiciel après un délai.

11.1.2. Résultats

Les cinq utilisateurs qui ont participé à l'expérience étaient familiers avec l'utilisation d'un ordinateur (régulièrement utilisé à la maison ou à l'école) et quatre utilisateurs sur cinq disaient aimer les mathématiques. Par contre certains avaient un faible niveau en lecture.

L'observation de ces utilisateurs et l'analyse de leurs réponses ont permis d'évaluer l'utilisabilité du logiciel et de mettre en évidence des problèmes importants.

La première partie du logiciel rencontrée par les utilisateurs était composée d'écrans statiques présentant le principe de AMBRE et les schémas utilisés dans le logiciel. Le temps passé sur cette partie a montré que ces informations n'étaient pas lues. Après cette présentation du logiciel, les utilisateurs pouvaient lire et analyser les exemples représentatifs de différentes classes de problèmes. Dans cette phase, les utilisateurs ont tous passé beaucoup de temps à chercher comment interagir avec le système mais peu de temps à comprendre le problème. En effet, les éléments d'interface utilisés dans cette étape évoquaient des cases à remplir. Par ailleurs, leurs attitudes (gestes et soupirs) durant cette phase laissent supposer qu'ils ressentaient une surcharge cognitive.

Après avoir vu les exemples, les élèves devaient résoudre les problèmes. D'une manière générale, comme l'indique le temps mis par tous les apprenants pour résoudre le premier problème (souvent plus de 30 minutes), la prise en main du logiciel est assez longue. Ce résultat n'est pas surprenant étant donné qu'il faut découvrir les consignes, les tâches à réaliser et les éléments d'interface. Les utilisateurs ont parfois éprouvé des difficultés pour comprendre le fonctionnement du logiciel (par exemple, ils ont eu des difficultés à identifier l'action à réaliser pour accomplir la tâche demandée) et pour utiliser certains éléments d'interface comme les listes déroulantes ou les flèches de navigation. Toutefois, la plupart de ces difficultés semblent disparaître lors du second problème (et l'enfant qui a à nouveau utilisé AMBRE-add une semaine plus tard l'a repris en main très facilement). Un problème d'ordre mathématique semble récurrent chez tous les utilisateurs même après avoir résolu un premier problème : après avoir construit l'addition à trou (ex : $32 + ? = 43$), ils ont tous de très grosses difficultés à trouver l'opération correspondante (ex : $43 - 32 = ?$) (Figure 30). Cette difficulté n'avait été évoquée avant l'expérimentation ni par la conseillère pédagogique ni par les enseignants ayant collaboré à la conception.

Il est à noter que l'attitude des utilisateurs durant l'étape d'adaptation (soupirs, gestes) ainsi que les difficultés exprimées dans le questionnaire laissent supposer que cette étape impose une charge cognitive trop importante.

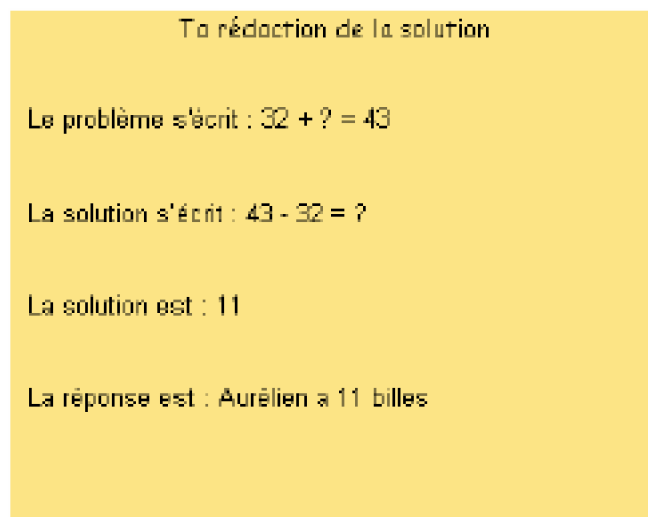


Figure 30 : Plan de rédaction de la solution

A l'issue de la première utilisation, le fonctionnement global du logiciel ne semble pas bien compris : les utilisateurs ne font pas vraiment le lien entre les différentes étapes.

Les erreurs commises par l'apprenant sont le plus souvent liées aux mathématiques et non à l'ergonomie du logiciel. Lorsqu'une erreur se produit, le logiciel fournit un message de diagnostic et d'explication. Lors de l'apparition de ce message, tous les utilisateurs comprennent qu'ils ont réalisé une erreur, mais ils ne comprennent pas toujours où se situe cette erreur, ce qui les conduit parfois à remettre en cause une étape juste. Le système d'aide n'a été que peu utilisé spontanément, les utilisateurs préférant interroger l'expérimentateur. Après une première suggestion, ceux-ci ont eu recours spontanément à l'aide et au diagnostic. Les messages d'aide ne sont pas toujours bien compris même si les réponses au questionnaire laissent supposer le contraire. La difficulté de compréhension de l'aide semble relative à un manque de compréhension du système (notion de problème-type, dénomination des différentes sous-étapes) plus qu'à un problème de vocabulaire ou de contenu.

En résumé, les utilisateurs ne prêtent pas attention à la présentation du logiciel. Dans la phase de présentation des exemples, ils cherchent comment interagir avec le système plutôt que lire et analyser des exemples. La prise en main de AMBRE-add est longue, mais ensuite, le logiciel s'utilise plus facilement. Une séance d'utilisation ne semble pas suffisante pour accéder à une compréhension satisfaisante du fonctionnement général du logiciel. Les erreurs commises sont liées aux mathématiques et non à l'interface, en particulier dans l'étape de résolution. L'aide et le diagnostic sont utilisés et pris en compte, mais les messages ne sont pas toujours bien compris.

11.1.3. Recommandations et modifications

Ces résultats ont conduit à faire des modifications sur le logiciel. Suite aux difficultés de

prise en main, nous avons choisi de remplacer la phase de présentation proposée au début du logiciel (à peine lue) par une présentation orale du principe général du logiciel, accompagnée d'une démonstration montrant d'une part le rôle des différentes étapes du logiciel et d'autre part le fonctionnement des différents éléments d'interface. Nous avons modifié quelques éléments de vocabulaire qui semblaient poser problème (ex : « inférieur à » remplacé par « plus petit que »).

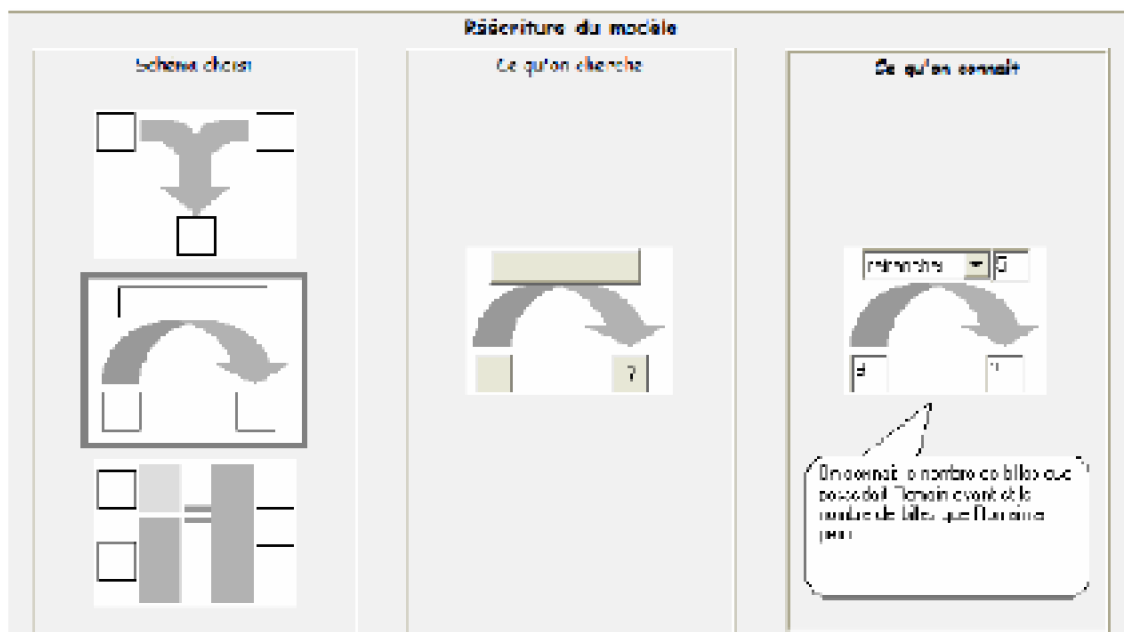


Figure 31 : Ancienne version de la présentation de la reformulation d'un problème résolu

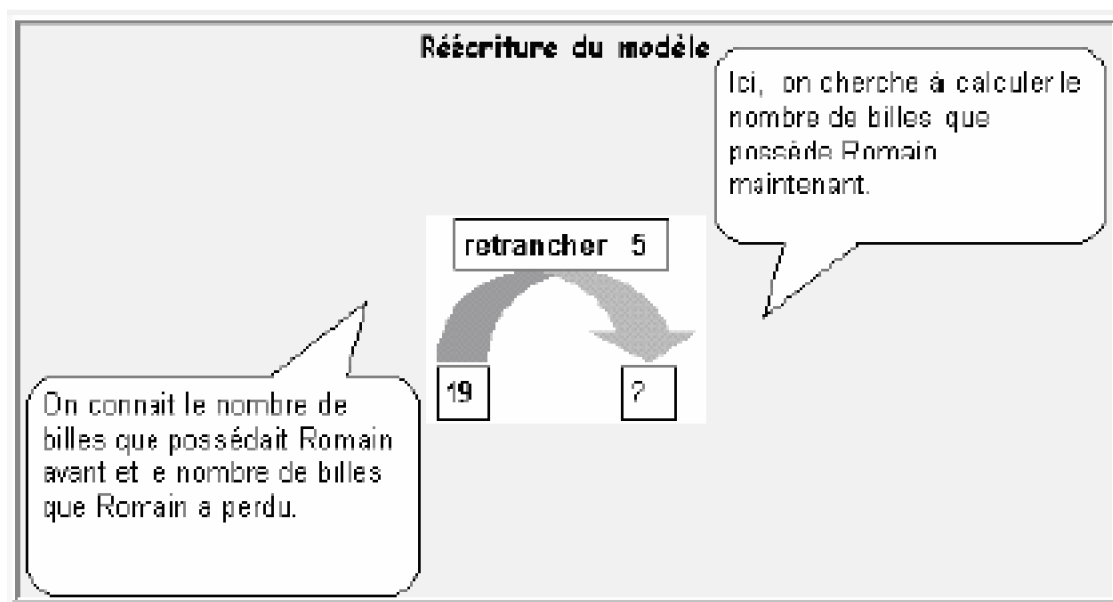


Figure 32 : Nouvelle version de la reformulation d'un exemple résolu

Par ailleurs, nous avons modifié l'apparence des exemples présentés. Nous avons modifié certains éléments de l'interface afin qu'ils n'évoquent plus des cases de saisie. De plus, afin de réduire le nombre d'informations à traiter, nous avons choisi de présenter un

seul schéma contenant toutes les informations, et de faire apparaître séquentiellement des bulles contenant des explications sur ces schémas (Figure 32)

Les bulles explicatives des schémas disparaissent lorsque le plan de résolution commence à apparaître afin de ne pas surcharger la fenêtre (cf. annexe 2).

Enfin, le plan de résolution a été adapté au CE1. En effet, la difficulté observée lors du passage de « le problème s'écrit » à « la solution s'écrit » a été confirmée par les enseignants. Au niveau CE1, les élèves résolvent directement le problème à partir de l'addition à trou ($32 + ? = 45$). L'équipe de conception a donc pris la décision de mettre en place deux modes pour la rédaction de la solution dans AMBRE-add : le mode CE1 et le mode CE2 (Figure 33). L'étape « la solution s'écrit » est absente du mode CE1 et est remplacée par la mise à disposition d'outils de calcul correspondant à ceux utilisés en classe (identifiés après enquête auprès des enseignants).

La rédaction de la solution Le problème s'écrit : $32 + ? = 45$ La solution s'écrit : $45 - 32 = ?$ La solution est : 11 La réponse est : Aurélien a 11 billes	La rédaction de la solution Le problème s'écrit : $32 + ? = 45$ La solution est : 11 La réponse est : Aurélien a 11 billes
Plan de résolution CE2	Plan de résolution CE1

Figure 33 : Les deux versions de la rédaction de la solution

Ces différentes modifications ont été prises en compte dans la version suivante du logiciel.

11.2. Evaluation de l'impact de AMBRE-add sur l'apprentissage

A partir de la version modifiée de AMBRE-add, nous avons réalisé une seconde expérience afin d'évaluer son impact sur l'apprentissage de la méthode de résolution des problèmes additifs. Dans ce but, nous avons choisi d'utiliser la méthode expérimentale en comparant le logiciel AMBRE-add à 2 logiciels contrôles conçus pour l'expérimentation. Nous avons souhaité conduire cette évaluation dans une situation réelle d'utilisation ; c'est pourquoi nous avons mené cette expérience dans une école primaire, avec 3 classes de CE1, soit 78 élèves âgés de 7 à 8 ans.

Nous avons plus particulièrement voulu vérifier que l'utilisation du cycle AMBRE facilite l'apprentissage de méthodes ; l'utilisation de cet EIAH devrait permettre à l'apprenant d'acquérir des classes de problèmes et devrait lui apprendre à construire l'équation correspondant à la classe. L'acquisition de cette méthode devrait ainsi faciliter la résolution de problèmes.

11.2.1. Principe de l'expérience

Pour tester l'impact de AMBRE-add sur l'apprentissage de la méthode, nous avons mis en place une expérience dans laquelle nous avons comparé l'utilisation de AMBRE-add à celle de deux logiciels contrôles par 78 élèves de CE1. Dans chaque classe de CE1, la moitié des élèves utilisait le logiciel AMBRE-add (Annexe 2) tandis que l'autre moitié utilisait l'un des deux logiciels contrôle. Les séances d'utilisation du logiciel se déroulaient dans la salle informatique de l'école durant 45 minutes chaque semaine pendant six semaines. L'apprentissage a été évalué à l'aide de plusieurs tests.

- La capacité à reconnaître que des problèmes appartiennent à la même classe était testée à la fin de chaque séance à l'aide d'une tâche de « détection des similarités de structure ». Celle-ci consistait à lire un premier problème puis à sélectionner parmi deux autres problèmes celui qui se résolvait de la même manière.
- La capacité à associer une équation à une classe de problèmes était testée en représentant un exemplaire d'une classe de problème par une reformulation puis en demandant à l'apprenant d'écrire l'équation correspondante.
- Un test papier-crayon consistant à résoudre des problèmes faciles et difficiles permettait de voir si le logiciel avait un impact dans une situation papier crayon et si l'utilisation de AMBRE-add facilitait la résolution de problèmes difficiles.

Bien qu'une observation sans intervention eut été plus objective, il n'était pas possible de laisser les élèves dans l'impasse étant donné que le test se déroulait à l'école durant le temps scolaire. C'est pourquoi nous avons adopté une observation participative. Nous avons complété cette approche expérimentale par une approche plus qualitative afin de tenir compte de la complexité de la situation et afin d'observer l'utilisation effective du logiciel. Avant l'expérience, nous avons fait une analyse a priori afin d'identifier les différentes stratégies possibles pour résoudre un problème en utilisant AMBRE-add. Par ailleurs, au cours de l'utilisation du logiciel, nous avons observé les stratégies employées par les apprenants, leurs difficultés, et nous avons noté les interactions entre apprenants et encadrants, le type d'aide apporté par les encadrants et l'ambiance de la classe. En complément, lors de quelques séances, nous avons observé individuellement quelques élèves en notant sur une fiche leurs stratégies d'utilisation du logiciel, leurs difficultés et leurs réactions.

Après la dernière séance d'utilisation, nous avons proposé un questionnaire et un entretien collectif afin d'avoir un retour des élèves eux-mêmes sur l'utilisation du logiciel. Enfin, nous avons analysé les traces d'interactions élève-système enregistrées par le logiciel.

11.2.2. Protocole expérimental

PARTICIPANTS

78 enfants (âge moyen 7 ans 5 mois) appartenant aux trois classes de CE1 de Villars les

Dombes participaient à cette expérience. Dans chaque classe, deux groupes d'élèves de niveau équivalent ont été constitués par les enseignants (une répartition aléatoire sur un effectif aussi faible ne nous a pas paru adapté).

MATÉRIEL

Les logiciels utilisés

Les logiciels utilisés pour l'expérience, AMBRE-add et deux logiciels contrôles (Figure 34) ont été installés dans la salle informatique de l'école sur 13 ordinateurs.

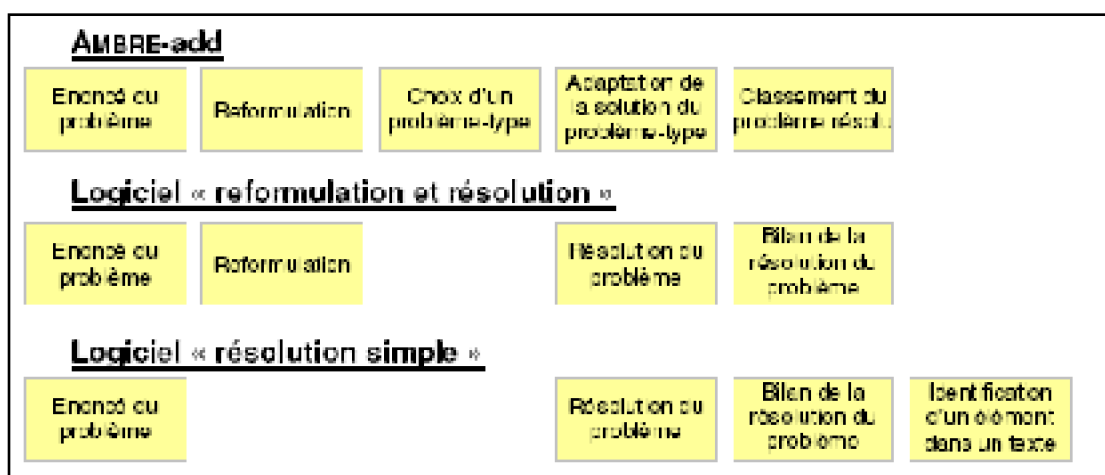


Figure 34 : Logiciels utilisés pour évaluer l'impact de AMBRE-add dans une approche comparative

AMBRE-add présente des problèmes résolus puis guide la résolution du problème à travers les étapes du raisonnement à partir de cas selon le principe de AMBRE.

Le premier logiciel contrôle (« reformulation et résolution ») (Annexe 3) présente des problèmes résolus puis demande à l'apprenant de reformuler le problème avant de le résoudre et de proposer un bilan de la résolution. Contrairement à AMBRE-add, ce système ne propose pas de choisir et d'adapter un problème-type. La comparaison de l'impact de ce logiciel avec l'impact de AMBRE-add sur l'apprentissage doit permettre d'évaluer si le choix d'un problème type et son adaptation ont un impact réel sur l'apprentissage, ou si la présentation d'exemples et l'étape de reformulation expliquent à elle seule l'impact du système.

Le second logiciel contrôle (« résolution simple ») (Annexe 4) présente d'abord des problèmes résolus puis propose de résoudre le problème directement sans reformuler le problème ou identifier un problème proche. Après la résolution, un écran présente également à l'apprenant un bilan du problème. La comparaison entre AMBRE-add et ce logiciel a pour but de vérifier si AMBRE-add facilite d'avantage l'apprentissage de la méthode qu'un logiciel proposant une résolution simple. Comme ce dernier logiciel comporte moins d'étapes que les autres logiciels, une étape complémentaire a été ajoutée pour limiter le nombre de problèmes résolus avec ce logiciel. Présentée entre deux problèmes, cette étape consistait à lire un texte décrivant une situation dans laquelle

des données numériques apparaissaient (comme dans un énoncé de problème) puis à identifier dans ce texte un nombre demandé (Figure 35). Nous avons choisi cette tâche car tout comme l'étape de reformulation elle entraîne les apprenants à rechercher et à identifier des informations dans un énoncé. Cependant, contrairement à l'étape de reformulation, les informations sélectionnées dans cette tâche ne permettent pas de résoudre un problème.

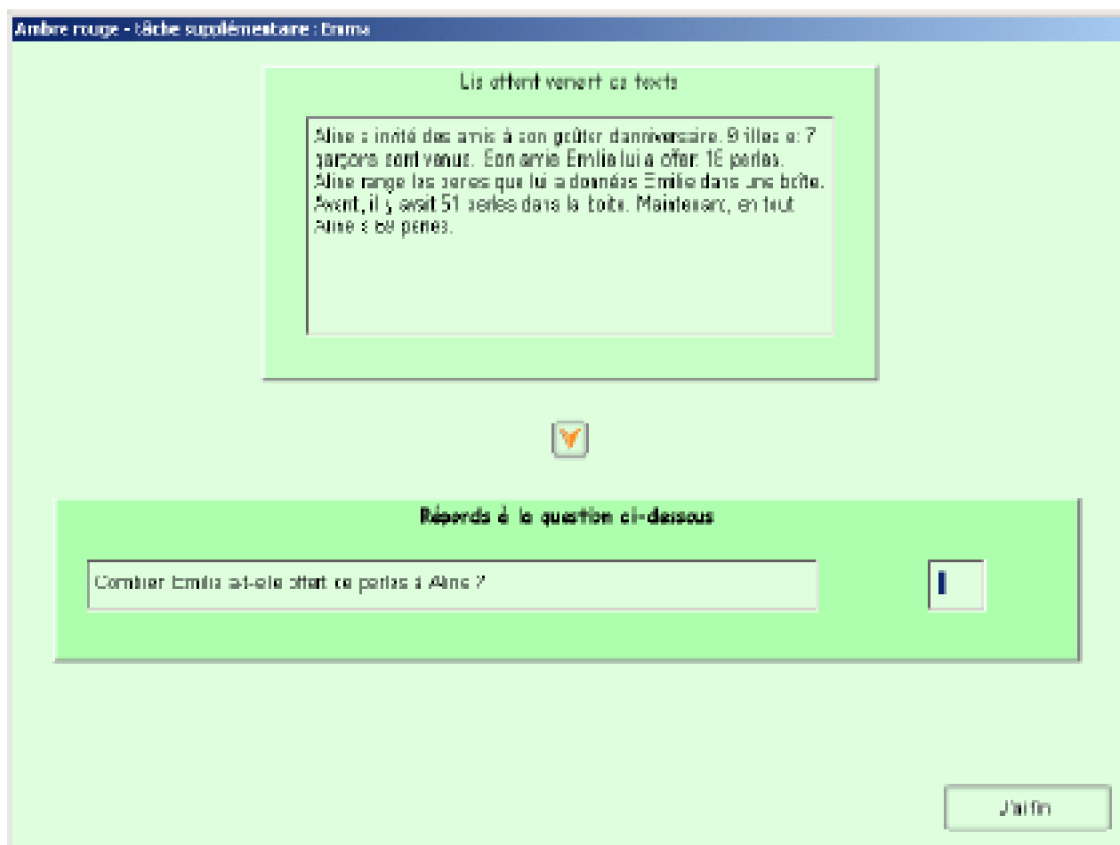


Figure 35 : Etape complémentaire du logiciel « reformulation simple » consistant à identifier une information dans un énoncé de problème

Problèmes présentés dans le logiciel

Les trois logiciels utilisés dans l'expérience présentaient tous les mêmes problèmes : des problèmes additifs de type réunion, changement ou comparaison. La base de problèmes utilisée dans cette expérience comprenait onze problèmes résolus, représentatifs de chaque classe de problèmes et 33 problèmes à résoudre (Annexe 6). Les problèmes résolus avaient tous un habillage identique (problèmes de billes) et des valeurs faibles. Le premier problème à résoudre avait le même habillage que les problèmes résolus tandis que les deux autres problèmes avaient un habillage assez différent. Les traits de surface correspondant à une classe de problèmes étaient réutilisés pour les autres classes. Ces problèmes avaient des valeurs comprises entre 30 et 60 (suivant les conseils des enseignants). Les valeurs numériques des problèmes posés à partir de la quatrième séance étaient écrites en lettres.

TÂCHES D'ÉVALUATION DE L'APPRENTISSAGE

Trois tâches différentes ont été utilisées pour évaluer l'impact de l'utilisation du logiciel sur l'acquisition de la méthode et la résolution de problèmes.

Tâche de détection de similarités de structures

Nous considérons que la méthode est acquise si un apprenant est capable d'identifier la classe d'un problème et d'associer une technique de résolution. Avant que la méthode ne soit totalement acquise, on peut supposer qu'elle est en cours d'acquisition si cet apprenant reconnaît que deux problèmes appartiennent à la même classe quels que soient les traits de surfaces du problème. Nous avons donc choisi une tâche qui permette de mettre en évidence les critères que les participants utilisent pour regrouper les problèmes qui se résolvent de la même manière. La tâche de tri (« sorting task » : voir par exemple Cummins, 1992) qui consiste à donner un ensemble d'énoncés à l'apprenant puis à lui demander de regrouper en différentes piles les problèmes qui se résolvent de la même façon, n'était pas utilisable dans notre expérience car elle impose une charge cognitive importante pour des élèves qui ont des difficultés de lecture. Nous avons donc choisi une tâche de choix forcé parfois utilisée dans les études sur la catégorisation (Annexe 5). Cette tâche consiste à présenter l'énoncé d'un premier problème puis à demander à l'apprenant de choisir l'énoncé qui se résout de la même façon parmi 2 autres énoncés (Figure 36). 18 tests composés à chaque fois de 3 problèmes (1 problème « cible », 2 problèmes parmi lesquels choisir) étaient présentés au cours de l'expérience. Nous avons choisi de faire disparaître le premier problème au moment de l'apparition des deux autres problèmes pour éviter que les apprenants ne se limitent à un appariement entre deux énoncés sur la base de leur forme syntaxique. L'un des deux énoncés à choisir différait du problème « cible » soit par le type de problème (combinaison, réunion, changement), soit par la place de l'inconnue. Nous avons également manipulé les traits de surface des problèmes (objets choisis, histoire) : dans 6 tests, tous les problèmes avaient des traits de surface identiques ; dans 6 autres tests, tous les problèmes avaient des traits de surface différents et dans les 6 derniers tests, parmi les 2 problèmes « à choisir », l'un avait des traits de surface identiques mais des traits de structure différents de ceux de la cible, l'autre avait des traits de surface différents mais des traits de structure identiques.

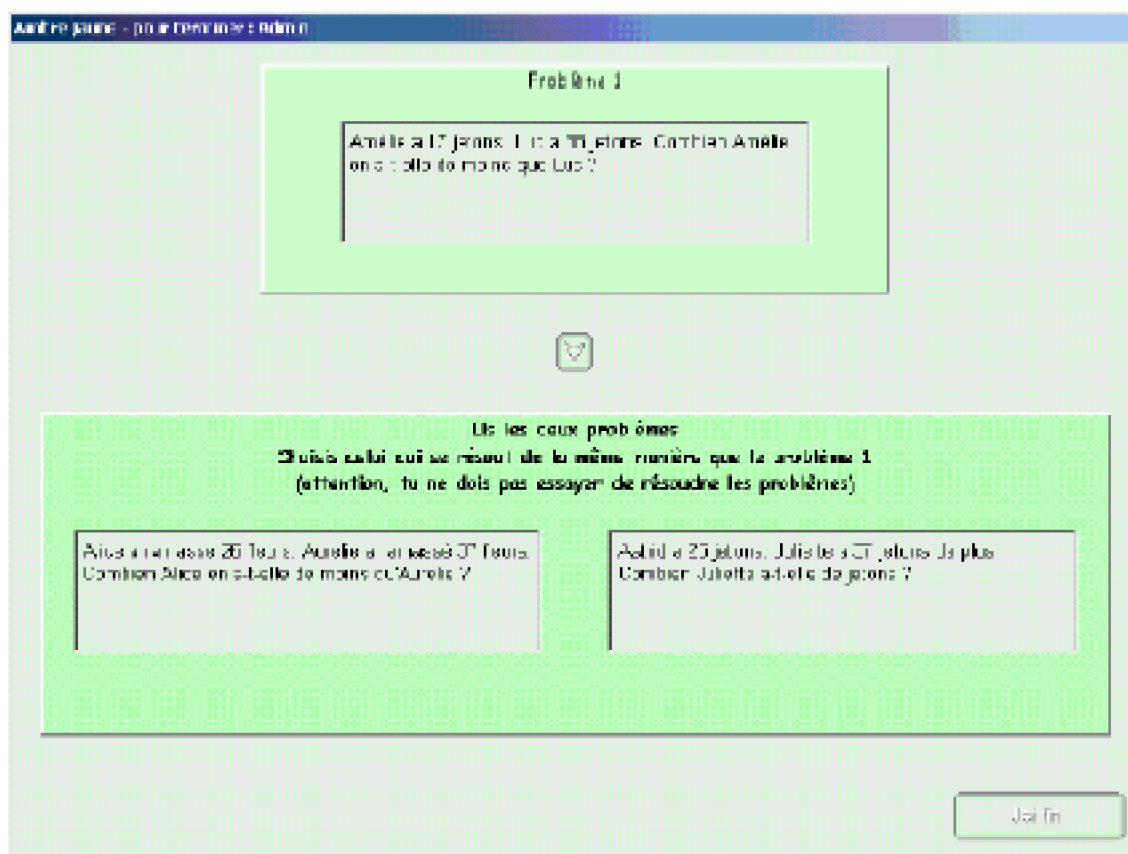


Figure 36 : Exemple de test de détection de similarités de structure

Si AMBRE-add facilite l'acquisition de classes de problèmes, alors les apprenants utilisant ce logiciel devraient plutôt choisir le problème en fonction de la structure du problème quels que soient les traits de surface.

Ecriture d'équation

L'objectif de cette tâche était d'évaluer la capacité des apprenants à associer correctement un outil de résolution à la classe, ici représentée par un schéma complété. Cette tâche consistait à écrire l'équation correspondant à la reformulation proposée. Six reformulations représentant l'une des classes de type réunion ou changement complétées avec des valeurs numériques (identiques dans chaque schéma) étaient présentées. Cette tâche était présentée sur ordinateur (Figure 37), l'équation à remplir étant de même type que l'équation proposée dans la phase d'adaptation de AMBRE. Seuls les groupes ayant utilisé les schémas étaient soumis à ce test.

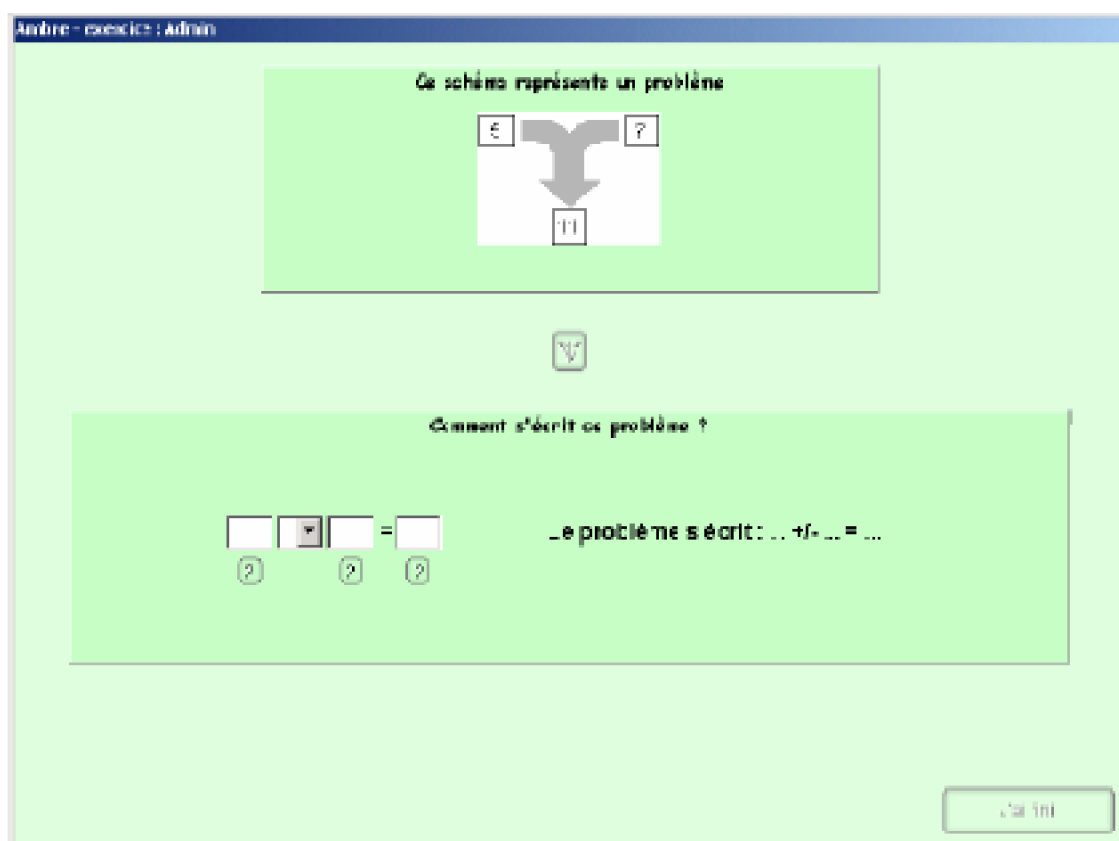


Figure 37 : Tâche d'écriture d'équation

Problèmes à résoudre

Une troisième tâche consistait à résoudre des problèmes. Ce test papier-crayon était composé de 6 problèmes à résoudre (Annexe 7) illustrant trois classes de problèmes (Figure 38). Pour répondre, les élèves devaient indiquer l'opération et la phrase de réponse.

Catégorie réunion	Catégorie changement Opérateur "enlever"	Catégorie changement Opérateur inconnu

Figure 38 : Classes des problèmes tests représentées par le schéma correspondant

Plus précisément, le test consistait donc à résoudre deux problèmes « simples » : des problèmes de réunion et des problèmes de changement avec l'opérateur « enlever », dont les traits de surfaces étaient proches de ceux utilisés dans le logiciel, puis quatre problèmes plus difficiles, des problèmes de réunion et des problèmes de changement

avec opérateur inconnu contenant des données non pertinentes pour la résolution. Les élèves ont répondu à ce test à quatre reprises durant la période de l'expérience. Les traits de surface des problèmes présentés dans chaque test variaient.

Si AMBRE-add facilite l'identification des éléments pertinents pour la résolution et favorise la construction de l'équation correspondant au problème, le groupe utilisant AMBRE-add devrait être moins perturbé par la présence des éléments non pertinents et devrait trouver plus facilement l'équation correspondant aux problèmes y compris pour les problèmes difficiles.

Evaluation de la compréhension des schémas

Nous avons souhaité évaluer le degré de compréhension des schémas. Pour cela, nous avons présenté trois reformulations représentatives de chaque catégorie de problèmes (réunion, changement, comparaison) et nous avons demandé aux élèves d'écrire un problème correspondant à chacun des schémas. Pour aider les élèves en difficulté, nous avons ajouté qu'ils pouvaient s'inspirer des problèmes vus dans le logiciel AMBRE-add.

OUTILS DESTINÉS AUX ANALYSES QUALITATIVES

Fiches d'observations

Afin de prendre en compte le contexte d'évaluation, des fiches d'observation ont été utilisées. Ces fiches étaient destinées à noter les questions des élèves, les réponses apportées, et les interventions des encadrants. Par ailleurs, une fiche de séance (Annexe 10) était destinée à noter les intervenants présents, le nombre d'élèves présents, le nom des absents, l'ambiance générale de la séance, la nature des interactions et les commentaires éventuels.

Enfin, une fiche d'observation individuelle permettait de noter les attitudes et les actions des élèves dans chaque étape du logiciel ainsi que leur attitude par rapport au système d'aide et de diagnostic.

Questionnaire et entretien collectif

Afin de recueillir des informations sur la manière dont les élèves ont vécu l'utilisation du système et de connaître leur satisfaction, un questionnaire (Annexe 8) a été proposé après l'utilisation du système. Le questionnaire a permis de recueillir l'opinion individuelle des enfants. Toutefois, certains élèves ayant des difficultés pour écrire, ce questionnaire a été complété par un « entretien collectif » qui a consisté à poser des questions ouvertes choisies portant sur l'intérêt du logiciel, les difficultés rencontrées ou encore l'apport de l'aide proposée par le logiciel.

11.2.3. Procédure

L'expérience s'est déroulée à l'école primaire de Villars les Dombes avec trois classes de CE1 sur une période de 11 semaines (Figure 39). Deux semaines avant l'utilisation du logiciel, l'expérience a débuté par un pré-test passé en classe, durant une demi-heure, qui

consistait à résoudre des problèmes sur papier (test présenté ci-dessus). Ensuite, les élèves ont été en salle informatique pour utiliser individuellement l'un des logiciels pendant six séances d'environ 45 minutes (une séance par semaine). Les élèves passaient par demi-classe (13 enfants par groupe) ; la moitié de chacune des trois classes utilisait AMBRE-add tandis que l'autre moitié utilisait l'un des deux logiciels contrôles. Ainsi, dans deux classes, les élèves ont utilisé soit AMBRE-add soit le logiciel « résolution simple » tandis que dans la troisième classe, les élèves utilisaient soit AMBRE-add soit le logiciel « reformulation-résolution ».

Les séances étaient encadrées par deux expérimentateurs, parfois accompagnés de la conseillère pédagogique participant au projet ou de l'aide éducatrice responsable de l'informatique à l'école. Durant l'utilisation du système, les encadrants notaient sur la fiche d'observation les questions et difficultés des élèves et les réponses qu'ils y apportaient.

La première séance d'utilisation était une séance de prise en main du logiciel. Une démonstration et une explication du fonctionnement du logiciel étaient d'abord faites par les expérimentateurs. Ensuite, dans le temps restant, les élèves utilisaient le logiciel pour résoudre un ou plusieurs problèmes.

Chacune des 5 séances suivantes consistait à utiliser le logiciel pendant 30 minutes puis à réaliser 3 tests de « détection de similarités de structure » durant le temps restant.

Durant les séances 2 à 4, les problèmes posés correspondaient chaque semaine à une catégorie de problèmes (réunion, changement et comparaison). Après la quatrième séance d'utilisation, un test de résolution de problèmes sur papier était à nouveau proposé en classe. Durant les séances 5 et 6, les logiciels présentaient des problèmes appartenant à toutes les classes déjà rencontrées. Lors de ces deux séances, les expérimentateurs ont pratiqué des observations individuelles. De plus, à la fin de la 5^e séance, 3 tests « d'écriture d'équation » ont été proposés.

La 7^e séance était consacrée à la réalisation de différents tests en salle informatique. Durant cette séance, les élèves utilisaient l'ordinateur pour passer 3 tests de « détection de similarités de structure » et 3 tests d'écriture d'équation (10 minutes). Ensuite, ils devaient réaliser le test de compréhension des schémas (15 minutes) et répondre au questionnaire (15 minutes). A la fin de la séance, durant les 10 minutes restantes, un entretien collectif était réalisé. Pendant que l'un des groupes était en salle informatique, l'autre groupe résolvait des problèmes « papier-crayon » en classe.

Trois semaines plus tard, un dernier post-test consistant à résoudre des problèmes était réalisé en classe.

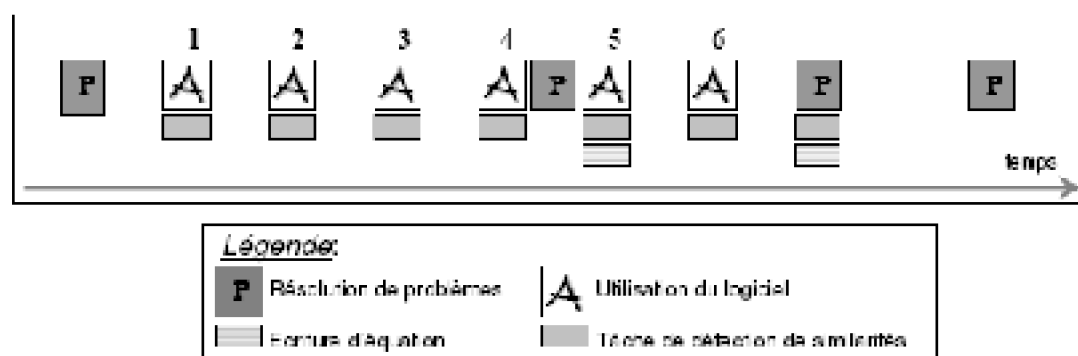


Figure 39 : Procédure expérimentale

11.2.4. Résultats

ANALYSE QUANTITATIVE

Les résultats de l'un des élèves n'ont pas été pris en compte du fait qu'il présentait de gros problèmes de lecture et de compréhension et n'a souvent pas respecté les consignes des tests.

Résolution de problèmes

Comme nous l'avons présenté dans la procédure, les élèves des 3 classes ont résolu à quatre reprises des problèmes « papier-crayon » faciles et difficiles. Les réponses ont été codées en considérant une réponse comme juste si l'élève a posé correctement l'opération correspondant au problème.

Rappelons que pour cette tâche, nous nous attendions à voir apparaître après quelques séances d'utilisation une différence de performances entre les élèves utilisant AMBRE-add et les élèves utilisant les logiciels contrôle, particulièrement pour les problèmes difficiles.

Nous avons analysé les résultats en pratiquant d'abord une analyse de variance à mesures répétées sur les réponses en considérant la variable inter-sujets *logiciel* (AMBRE-add, reformulation-résolution, résolution simple) et la variable intra-sujets *test* (pré-test, test intermédiaire, post-test, post-test différé). Les résultats montrent un effet du *test* (pré-test : 44% de réussite, post-test différé : 68 % de réussite) ($F(3,192)=18.11$; $p<0,001$), mais pas d'effet d'interaction *logiciel*test* ($F(6,192)=1.16$, $p=.334$). Ainsi, l'analyse des performances obtenues sur l'ensemble des problèmes (faciles et difficiles) ne met pas en évidence de différence entre les élèves ayant utilisé AMBRE-add et les élèves ayant utilisé les logiciels contrôles.

Afin d'évaluer l'impact du facteur « classes d'élèves », nous avons réalisé une analyse de variance à mesures répétées en considérant les variables *classe d'élèves* (3 modalités) et *test* (4 modalités). Les résultats montrent un effet principal de la variable *test* ($F(3,192)=24.45$; $p<.001$), un effet principal de la *classe* ($F(2,64)=6.73$; $p<.01$), et une tendance à un effet d'interaction ($F(6,192)=2.07$; $p=.058$). Ces résultats mettent donc en évidence des différences de performances importantes entre les classes.

Rappelons que dans chaque classe, une partie des élèves utilisait AMBRE-add tandis que l'autre partie utilisait un des logiciels contrôle. Les différences entre classes ne nous empêchent pas de comparer AMBRE-add à chaque logiciel contrôle mais rendent hasardeuse la comparaison entre les deux logiciels contrôles. Par la suite, nous comparons donc séparément AMBRE-add à chaque logiciel contrôle.

Nous avons choisi de ne présenter que les analyses effectuées sur les performances obtenues pour les problèmes difficiles pour lesquels nous nous attendions à observer les différences les plus importantes.

· Comparaison de AMBRE-add avec le logiciel « reformulation-résolution »

Une analyse de variance à mesures répétées réalisée sur les réponses aux problèmes difficiles en considérant les facteurs *logiciel* (AMBRE-add, reformulation-résolution) et *test* montre un effet principal du *test* ($F(3,60)=11.4$; $p<.001$) mais pas d'effet du *logiciel* ($F(1,20)<1$; $p=.957$) ni d'effet d'interaction ($F(3,60)<1$; $p=.647$) (Figure 40).

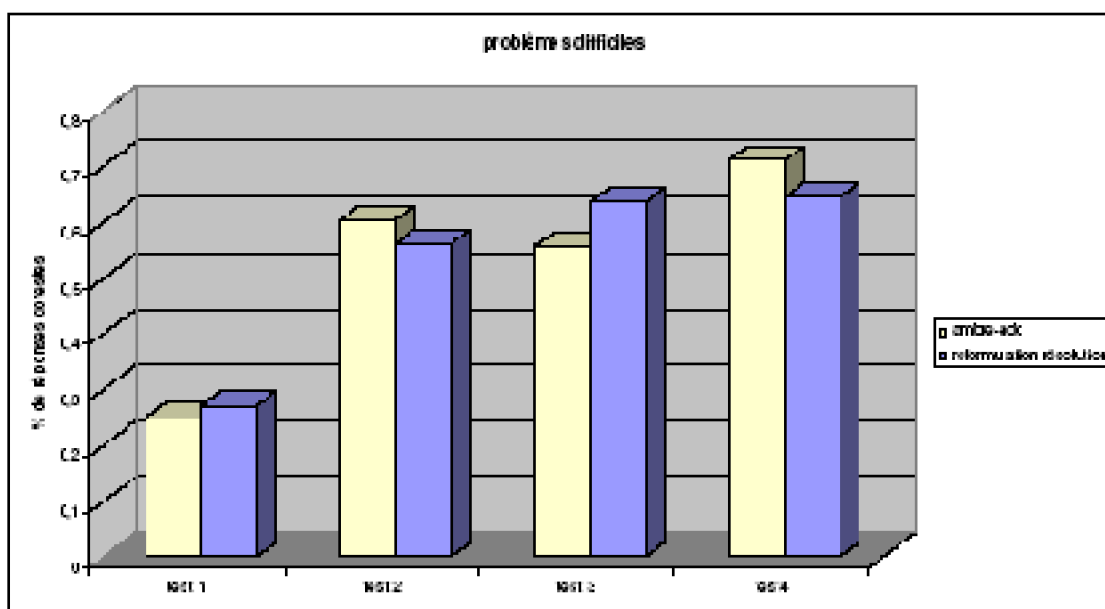


Figure 40 : Moyenne des réponses produites sur les problèmes difficiles

· Comparaison de AMBRE-add avec le logiciel « résolution simple »

Les mêmes analyses ont été réalisées en considérant les résultats des groupes ayant utilisé les logiciels AMBRE-add et résolution simple. Ces analyses mettent en évidence un effet principal des *tests* ($F(3,120)=7.85$; $p<.001$) mais pas d'effet du logiciel ($F(3,40)<1$; $p=.35$) ni d'effet d'interaction ($F(3,120)<1$; $p=.88$) (Figure 41).

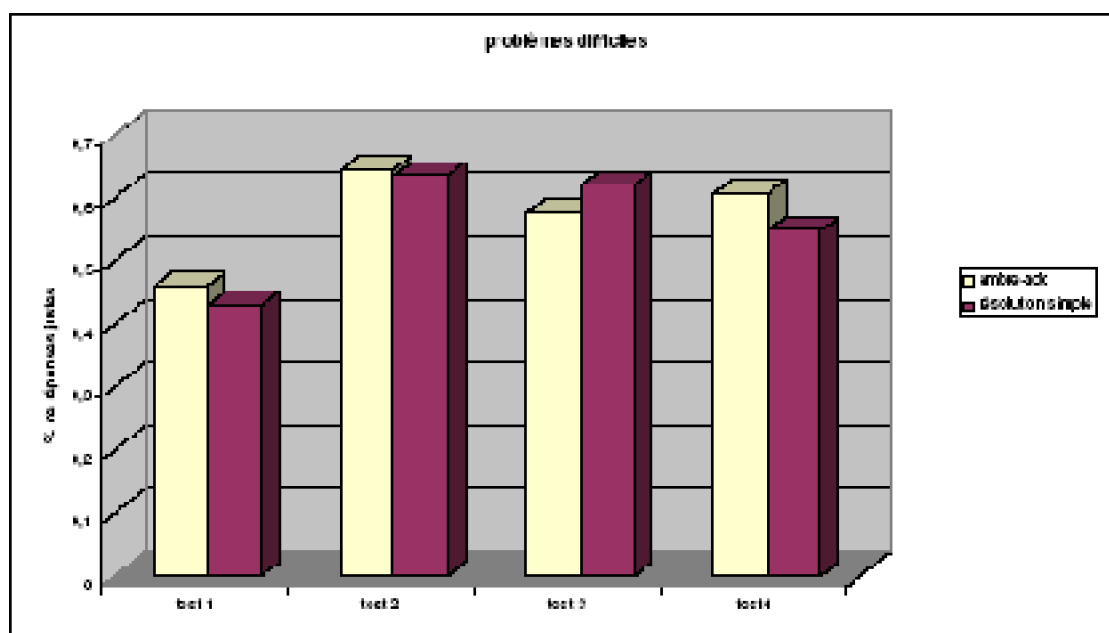


Figure 41 : Moyenne des réponses produites sur les problèmes difficiles

En résumé, d'après ces analyses, les élèves ont progressé mais cette progression ne dépend pas du logiciel utilisé. On ne peut donc pas conclure que le cycle AMBRE proposé dans AMBRE-add facilite la résolution de tests papier-crayon.

Test de détection de similarités de structures

Durant le déroulement de ce test, le temps de lecture du premier problème et le temps mis pour répondre étaient enregistrés.

Nous avons d'abord analysé les temps mis par les élèves pour lire le premier problème (moyenne=22s ; écart-type=7) puis pour répondre (moyenne= 22s). Ces temps sont assez faibles. Or les élèves de CE1 étant des lecteurs débutants, beaucoup de temps leur est nécessaire pour lire une phrase. Beaucoup d'élèves ont donc sans doute choisi une réponse aléatoirement sans lire les différents énoncés. Nous avons choisi d'éliminer les réponses aléatoires en supprimant les réponses pour lesquelles les temps de lecture étaient inférieurs à deux écart-type de la moyenne (<8 s). Nous avons ainsi éliminé environ 30% des réponses (les réponses que nous avons analysées ne sont donc pas représentatives de l'ensemble des élèves).

L'analyse des réponses sur l'ensemble des séances ne montre aucune différence entre les groupes utilisant AMBRE-add et les groupes utilisant le logiciel « reformulation-résolution » ($\chi^2(df=1)=1.01$; $p=.314$) ou le logiciel « résolution simple » ($\chi^2(df=1)=0.00$; $p=.987$) (respectivement 54%, 59% et 54% de réussite). Une analyse des résultats par catégorie de problèmes (réunion, comparaison, changement) ne montre pas d'avantage de différence intergroupe. Une analyse des résultats tous groupes confondus montre que lorsque les problèmes présentés appartiennent à la même classe et ont des traits de surface identiques (configuration présentée dans séances 2, 4, 5, 7) on observe une amélioration des performances au cours du temps. Dans les séances 2 et 4, le pourcentage de réussite est proche du hasard (53% de réponses correctes) alors

que dans les séances 5 et 7 il est significativement supérieur au hasard (74% de réponses correctes, $\chi^2(df=1)=14.94$; $p<.001$).

Cependant, lorsqu'il faut choisir entre un problème isomorphe ayant des traits de surface différents du problème source et un problème non isomorphe ayant les mêmes traits de surface que le problème source, le pourcentage de réussite est à nouveau proche du hasard (45% de réussite). Dans cette situation, les réponses sont significativement moins bonnes que lorsque les traits de surface de tous les problèmes sont identiques (45% vs 74%, $\chi^2(df=1)=35.4$; $p<.001$). Ces résultats laissent supposer que les élèves discriminent mieux que deux problèmes appartiennent à la même classe après plusieurs séances d'utilisation des logiciels, mais qu'ils sont encore très influencés par les traits de surface des problèmes.

Ce test ne met donc pas en évidence de différence de performances suivant le logiciel utilisé. De plus, même si on observe une progression entre les premières et les dernières séances, on ne peut pas en conclure que les élèves soient capables d'apparier les problèmes selon leur classe.

Écriture de l'équation correspondant à la classe

Rappelons que cette tâche consistait à présenter au sujet une reformulation et à lui demander d'écrire l'équation correspondante afin de mesurer la capacité des apprenants à associer une équation à une classe de problème. Elle n'a été proposée qu'aux groupes utilisant AMBRE-add et le logiciel « reformulation-résolution », le groupe utilisant le logiciel « résolution simple » n'ayant jamais rencontré les schémas.

Un codage binaire a été appliqué sur les réponses, toutes les équations mathématiquement correctes ayant été codées comme justes.

Le taux de réussite (en moyenne 56%) est très dépendant de la classe du problème (Tableau 7).

La comparaison des groupes « reformulation-résolution » et AMBRE-add (respectivement 50% vs 61% de réussite) ne montre pas de différence entre les deux groupes, juste une tendance ($\chi^2(df=1)= 2.79$; $p=.09$). Une analyse des réponses test par test ne montre pas d'avantage de différences intergroupes.

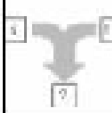
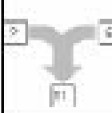
						
AMBRE-add	77%	68%	57%	67%	72%	31%
Reformulation-résolution	77%	54%	48%	58%	50%	29%
Total	77%	61%	48%	63%	61%	30%

Tableau 7 : Pourcentage de bonnes réponses en fonction du schéma présenté

Compréhension des schémas

La compréhension des schémas a été évaluée lors de la 7^e séance en demandant aux

élèves ayant utilisé « reformulation-résolution » ou AMBRE-add d'écrire un problème correspondant à chaque schéma (les schémas représentant les catégories réunion, changement et comparaison). Le test et différents exemples de réponses sont présentés en Annexe 12). Il est à noter que la plupart des élèves n'ont pas pu finir la réalisation de cette tâche dans le temps imparti, c'est pourquoi nous n'avons que très peu de résultats pour le troisième schéma.

Nous avons analysé ces productions en classant les réponses en fonction des trois catégories de problèmes (réunion, changement, réunion) et d'une catégorie autre (pas de réponse ou problème proposé inclassable (Tableau 8).

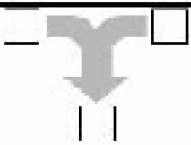
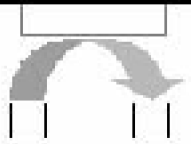
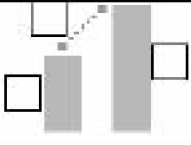
	réunion	changement	comparaison	autre	total
Annexe 1. 	11	16	0	11	38
Annexe 2. 	6	12	0	6	24
Annexe 3. 	3	8	2	3	16
total	20	36	2	20	

Tableau 8 : Nombre de réponses produites pour chaque schéma classées par catégorie

L'analyse des résultats montre d'abord que les élèves ont tendance à produire des problèmes de changement quel que soit le schéma (46% des réponses, tous schémas confondus). En effet, ces problèmes sont les plus régulièrement proposés en classe et dans le logiciel. Ainsi, même si la moitié des élèves produisent un énoncé correct pour le schéma changement, il est difficile de savoir dans quelle mesure ce schéma est assimilé. Pour le schéma représentant la catégorie réunion, 30 % des élèves ont produit un énoncé correspondant à cette catégorie. Quant au schéma de comparaison, seulement 16 élèves ont réalisé la tâche demandée et parmi ces élèves, seuls 2 ont produit un énoncé correspondant à la catégorie comparaison. Ces différents résultats laissent penser que les schémas réunion et comparaison sont assez mal compris, et ne permettent pas de tirer des conclusions concernant le schéma changement.

En résumé, l'analyse quantitative des résultats ne met pas en évidence de différence de performance liée au logiciel utilisé. Les élèves progressent autant quel que soit le logiciel utilisé. Par ailleurs, les résultats des tests de « détection de similarités de structure » et « d'écriture de l'équation correspondant à la classe » ne permettent pas de conclure que les élèves ayant utilisé AMBRE-add ont acquis une méthode. Enfin, il semble que les apprenants n'aient pas bien compris les schémas utilisés dans AMBRE-add pour reformuler le problème. Le cycle AMBRE proposé par AMBRE-add ne semble donc pas

avoir l'impact attendu sur l'apprentissage.

A travers la description de l'utilisation des logiciels en situation, l'analyse qualitative peut apporter des éléments permettant d'expliquer ces résultats.

ANALYSE QUALITATIVE

L'analyse qualitative consistait à observer le déroulement de la séance et les élèves au cours de la résolution) et à proposer un questionnaire de satisfaction. Par ailleurs, les traces d'interactions étaient enregistrées tout au long de l'utilisation du logiciel. Pour des raisons techniques, ces traces d'utilisation n'ont pu être exploitées pleinement. Nous présentons ici une synthèse des résultats issus de ces données.

Les élèves

Dans l'ensemble, les élèves se sont déjà servis d'un ordinateur et deux tiers d'entre eux l'utilisent régulièrement principalement pour faire des jeux (65% des élèves), des dessins ou des mathématiques (30% des élèves). 56 % des élèves affirment aimer beaucoup les maths tandis que 15 % affirment ne pas aimer cette matière.

Déroulement des séances

Tout d'abord, il est à noter que des problèmes de gestion du temps se sont posés tout au long de l'expérience en raison de contraintes liées au déplacement des élèves de leur classe à la salle informatique. Par ailleurs, des problèmes techniques liés au réseau de la salle informatique ont parfois provoqué des bugs. Ces différentes difficultés ont pu parfois perturber les élèves lors de l'utilisation du système ou lors de la réalisation des tests.

Tout comme en classe, l'attitude des élèves durant l'utilisation du logiciel était très variable : certains élèves étaient très studieux, d'autres très passifs (si leur réponse est fausse, ils attendent que le temps passe), tandis que certains élèves étaient très agités.

Les séances étaient encadrées par deux personnes impliquées dans le projet et parfois une troisième personne (conseillère pédagogique ou aide éducatrice). Les encadrants étaient là pour résoudre les problèmes techniques et pour débloquer les élèves en difficulté. Dans ce dernier cas, les élèves étaient d'abord renvoyés vers l'aide. Si l'aide ne suffisait pas les encadrantes donnaient des explications (certaines explications étant prédéfinies). Les encadrantes ont été très sollicitées, particulièrement lors des quatre premières séances. Les réponses types n'étaient souvent pas suffisantes pour aider les élèves. Les interventions faites ont donc été notées pour plus de transparence.

Les séances d'utilisation du logiciel ont débuté par une séance de prise en main. L'analyse des traces a montré que les deux (ou trois) premières séances ont été nécessaires pour prendre en main les logiciels AMBRE-add et « reformulation-résolution », le nombre de problèmes résolus durant les séances 1 et 2 était en effet significativement moins bon que le nombre de problèmes résolus à partir de la séance 4 ($F(5,225)=5.04$, $p<.001$). De plus, les élèves avaient des difficultés de navigation au cours des trois premières séances. Les encadrantes sont donc souvent intervenues durant ces séances

pour rassurer les élèves (par exemple pour leur assurer qu'il était permis de faire les actions qu'ils souhaitent effectuer), pour les aider à naviguer dans le logiciel (par exemple pour la circulation entre étapes) et pour les aider à comprendre le fonctionnement du logiciel et les éléments d'interface.

Il est à noter que si les interventions étaient de même nature pour les logiciels AMBRE-add et « reformulation-résolution », elles étaient de nature assez différente pour le logiciel « résolution-simple » (nous détaillons par la suite ce dernier point).

Utilisation du logiciel AMBRE-add

A partir des observations et des traces d'interaction, nous décrivons ici la manière dont les apprenants utilisent le logiciel AMBRE-add en situation scolaire.

Pour commencer, AMBRE-add présente des exemples résolus à analyser. Les élèves passaient en moyenne 1 minute 3 secondes par exemple résolu (écart-type : 25 secondes) puis environ 1 minute sur le bilan des exemples. L'observation a montré que certains élèves adoptaient un raisonnement anticipatif sur les exemples, tandis que d'autres n'y accordaient que peu d'attention.

Ensuite, AMBRE-add propose des problèmes à résoudre. Après la prise en main du logiciel, les élèves résolvaient en moyenne 1,6 problème par séance. Lors de l'étape de reformulation, certains élèves semblaient identifier le schéma facilement tandis que d'autres essayaient les schémas les un après les autres. Les plus grosses difficultés étaient observées lors de l'identification de l'inconnue. Dans cette étape, les encadrantes sont beaucoup intervenues pour faire relire le problème afin d'aider les élèves à identifier l'inconnue.

L'étape de choix d'un problème-type n'a pas semblé poser de difficultés. La plupart des élèves choisissaient en comparant la reformulation du problème à résoudre à la reformulation des problèmes types. Toutefois, certains élèves choisissaient par « essai-erreur ».

L'étape d'adaptation posait plus de difficultés liées à la fois aux mathématiques et à l'utilisation du logiciel. Les élèves éprouvaient en particulier des difficultés pour écrire l'équation correspondant au problème ; l'observation a montré que peu d'élèves s'aidaient de la reformulation ou de la solution du problème-type. Une fois cette équation trouvée, certains élèves ne faisaient pas le calcul indiqué mais une simple addition des nombres présents dans l'énoncé. Lorsqu'ils faisaient le bon calcul, ils ne maîtrisaient pas les techniques de calcul et faisaient beaucoup d'erreurs. Lors de l'écriture de la phrase réponse, quelques-uns recalculaient à nouveau la solution, sans faire le lien avec les calculs précédents. Une autre erreur récurrente consistait à écrire une phrase vraie, déjà donnée dans l'énoncé, mais qui ne répond pas à la question (cette erreur semble due à un oubli de la question posée dans l'énoncé). Enfin, dans l'étape de classement, les élèves identifiaient très rapidement le problème prototypique avec lequel ranger le problème résolu, mais avaient des difficultés à réaliser ce qui était demandé en raison de problèmes ergonomiques.

Tout au long de la résolution, nous avons observé que les messages d'aide et de diagnostic étaient peu lus, ou mal compris. Les élèves n'étaient souvent pas capables de

situer leur erreur. Une partie importante des interventions des encadrants a donc consisté à expliciter les messages de diagnostic et à aider les élèves à identifier où se situait leur erreur.

Comparaison avec l'utilisation des logiciels contrôles

Des observations et des traces d'utilisation ont également été recueillies pour les logiciels contrôles. Nous avons choisi de ne pas détailler l'utilisation de ces logiciels mais de présenter plutôt les points communs et les différences avec l'utilisation de AMBRE-add.

Tout d'abord, le nombre de problèmes résolus variait suivant le logiciel utilisé : une fois les logiciels pris en main, les élèves résolvaient en moyenne 1,6 problème par séance avec AMBRE-add et avec le logiciel « reformulation-résolution » et 2,5 problèmes avec le logiciel « résolution simple ». Une analyse de variance à mesures répétées montre une différence significative entre AMBRE-add et le logiciel « résolution simple » ($F(1, 45) = 9.56$; $p < .01$) quant au nombre de problèmes résolus.

Globalement, AMBRE-add et le logiciel « reformulation-résolution » ont été utilisés de façon assez similaire. Le même type de difficulté était relevé et les mêmes interventions étaient données par les encadrants.

En revanche, des différences importantes entre AMBRE-add et le logiciel résolution-simple ont été notées. Les élèves utilisant le logiciel résolution-simple ont eu de grandes difficultés à écrire l'équation correspondant au problème. Outre les difficultés rencontrées pendant la prise en main du logiciel, certains élèves avaient des difficultés importantes liées aux mathématiques. En effet, en classe de CE1, les élèves ont du mal à proposer une représentation abstraite de la situation, même sous la forme d'une addition à trou. Certains élèves préfèrent dessiner la situation (en représentant les objets un par un). Face aux demandes d'aide des élèves totalement bloqués, les encadrants ont dû faire beaucoup plus d'interventions liées aux mathématiques qu'avec AMBRE-add, en aidant les élèves à identifier ce qui était demandé dans l'énoncé et les éléments déjà connus. Ainsi, l'aide apportée pour les élèves utilisant ce logiciel a été plus importante que l'aide apportée pour les autres logiciels, et pouvait parfois ressembler à l'étape de reformulation des autres logiciels.

Il est à noter qu'à partir de la 4^e séance, ce groupe a demandé beaucoup moins d'aide, les élèves semblaient être plus autonomes.

L'opinion des élèves et des enseignants sur le logiciel

Le questionnaire et l'entretien collectif ont permis de recueillir l'opinion des élèves. D'après les questionnaires, 65% des élèves ont trouvé l'utilisation de AMBRE-add très facile, 15% l'ont jugé assez facile, 10% ont eu une réponse neutre, et 10 % ont trouvé son utilisation très difficile. Pour l'utilisation du logiciel « reformulation-résolution », 60% ont trouvé son utilisation très facile mais 25 % ont trouvé son utilisation très difficile, et 15 % ont eu une réponse neutre. Parmi les élèves qui ont utilisé le logiciel résolution simple, environ 50 % ont trouvé son utilisation très facile, 25% l'ont trouvé assez facile et 25 % ont eu une réponse neutre.

70 à 80 % des élèves ont trouvé l'utilisation de AMBRE-add et du logiciel « reformulation-résolution » très agréable contre 50 % des élèves utilisant le logiciel résolution simple. L'appréciation des élèves sur les logiciels est donc plutôt positive. Les élèves disent surtout avoir apprécié d'utiliser un ordinateur et d'avoir fait des problèmes mathématiques. Certains disent avoir eu des difficultés à trouver le schéma ou à rédiger la solution et environ 40 % des élèves déclarent avoir eu du mal à comprendre les mots employés dans le logiciel.

11.2.5. Discussion

Le test de résolution de problèmes montre une progression des élèves lorsque l'un des logiciels est utilisé. Cependant, l'utilisation de AMBRE-add n'a pas plus d'impact sur l'apprentissage que les logiciels contrôles. Par ailleurs, les tests destinés à évaluer spécifiquement l'acquisition de la méthode ne permettent pas d'affirmer que des classes de problèmes ont été acquises ni qu'elles peuvent être liées à des outils de résolution. Ces différents résultats ne mettent donc pas en évidence d'impact du principe de AMBRE (le « cycle AMBRE ») sur l'apprentissage de la méthode.

On peut proposer différentes explications à cette absence de différences de performances entre logiciels. D'abord, il faut souligner différentes difficultés d'ordre méthodologique qui rendent la comparaison entre logiciels difficile. D'une part, le déroulement du test de choix forcé n'a pas été conforme au protocole. En effet, dans 30 % des cas, les élèves ont répondu sans lire les énoncés des problèmes présentés. Les résultats obtenus sur les données restantes ne sont pas très représentatifs de l'ensemble des réponses données et sont donc difficilement interprétables. Comme ce test est fait en fin de séance, cette attitude peut s'expliquer par une baisse de concentration et de motivation. De plus, dans le logiciel AMBRE-add, aucun message de diagnostic n'est donné lorsque la réponse est juste. Certains élèves ont pu interpréter l'absence de diagnostic négatif comme un indice de réussite. Ainsi la tâche de choix forcé telle qu'elle a été présentée n'est pas très adaptée pour évaluer la capacité des apprenants à reconnaître que deux problèmes appartiennent à la même classe. D'autre part, le groupe utilisant le logiciel résolution simple a résolu plus de problèmes que les autres groupes (14 problèmes au cours des 6 séances contre 9 problèmes en moyenne avec AMBRE-add). Enfin, l'assistance fournie par les encadrants était de nature différente suivant les groupes. Lors de l'utilisation des logiciels AMBRE-add et « reformulation-résolution », les encadrants reformulaient les messages d'aides et de diagnostic en aidant l'apprenant à se situer dans le logiciel. Dans le groupe « résolution simple » les encadrants aidaient les apprenants à reformuler le problème pour identifier l'inconnue et les informations pertinentes pour la résolution, ce qui pouvait parfois ressembler à ce qui était demandé dans l'étape de reformulation de AMBRE-add.

Par ailleurs, les élèves ont éprouvé des difficultés à utiliser le logiciel. Ils ont souvent eu des difficultés pour lire les instructions et les différents messages. Ils ont également eu des difficultés à identifier les raisons de leurs erreurs, ce qui a souvent limité leur progression. Par ailleurs, ils ne maîtrisent pas la technique de calcul. La sous-étape consistant à calculer la solution numérique leur a donc souvent demandé un effort important alors qu'elle n'est pas essentielle pour l'apprentissage de la méthode, ce qui a

pu nuire à cet apprentissage.

Enfin, l'utilisation effective du logiciel était souvent différente de l'utilisation prescrite ; il semble que les élèves n'aient pas mis en œuvre les processus de généralisation dans les différentes étapes. Lors de l'analyse des exemples, certains apprenants ont mis en œuvre un raisonnement anticipatif tandis que d'autres n'ont pas accordé d'attention aux problèmes-types. Dans l'étape de reformulation, les apprenants ont éprouvé des difficultés importantes et certains remplissaient cette étape par tâtonnement ou avec l'aide d'un encadrant. Dans l'étape de choix du problème-type, ils devaient comparer les problèmes avant de choisir. S'ils réussissaient facilement à choisir le bon problème, ils ne consacraient que peu de temps à comparer les problèmes. Enfin, nous attendions la mise en œuvre d'un processus d'adaptation lors de l'étape du même nom ; or les élèves n'utilisaient que très rarement le problème-type ou la reformulation pour construire l'équation associée au problème. Notons qu'il est possible que dans l'étape d'adaptation, les élèves aient eu des difficultés à mettre en lien les différentes informations présentes sur l'interface. En effet pour disposer les différentes informations dans l'interface nous avons suivi des principes ergonomiques fondés sur l'observation de sujet adultes. Cette disposition est peut-être moins pertinente pour de jeunes enfants.

Ainsi, dans cette expérience, le principe de AMBRE ne permet pas l'apprentissage de méthode. AMBRE-add semble trop compliqué pour des élèves de CE1. L'équipe du projet AMBRE travaille actuellement sur la conception d'activités plus simples, accessibles pour des élèves de CP et CE1. Ces activités font travailler séparément les compétences demandées pour utiliser AMBRE-add. Elles peuvent être préparatoires à l'utilisation de AMBRE-add ou proposées en remédiation.

Par ailleurs, nous avons apporté des modifications à AMBRE-add ; nous avons retravaillé les messages d'aide et de diagnostic afin qu'ils soient plus compréhensibles et qu'ils permettent aux élèves de mieux comprendre et de mieux situer leurs erreurs. Nous avons également cherché à identifier des apprenants pour qui AMBRE-add serait plus adapté ; c'est pourquoi nous avons procédé à une nouvelle expérience avec des enfants d'un niveau plus élevé.

11.3. Evaluation de l'adéquation de AMBRE-add à des élèves de CE2

En début de CE2, les élèves ont plus de facilité à lire et une plus grande maîtrise des techniques de calcul qu'en classe de CE1. Néanmoins, la modélisation des classes de problèmes additifs les plus difficiles leur pose encore des difficultés ; ces problèmes sont donc encore abordés en classe à ce niveau. AMBRE-add nous semble donc plus adapté aux élèves de CE2. Pour le vérifier, nous avons réalisé une expérience avec des élèves de ce niveau afin d'observer la manière dont ils utilisent AMBRE-add. A travers cette expérience, nous voulions observer si l'utilisation effective du logiciel correspondait à l'utilisation prescrite et identifier les difficultés rencontrées par ce public.

Dans cette expérience, 21 élèves en fin de CE2 ont utilisé AMBRE-add durant quatre séances de 45 minutes. Nous avons donc observé l'utilisation effective du logiciel par les apprenants en situation. De plus, nous avons recueilli certaines traces d'interactions.

Enfin, à l'issue de la quatrième séance, nous avons fait remplir un questionnaire afin d'identifier les difficultés perçues par les apprenants et afin d'évaluer leur satisfaction. Nous avons également fait passer un test de compréhension des schémas.

A travers ces différentes méthodes, nous voulions d'abord identifier les activités effectivement réalisées par les apprenants lors des différentes étapes du cycle AMBRE. Le diagnostic ayant une fonction importante dans le logiciel, nous nous sommes également intéressée à l'utilisation du système d'aide et de diagnostic et aux réactions face aux explications délivrées. Enfin, nous voulions savoir si les élèves ont eu une bonne compréhension du principe général de AMBRE.

11.3.1. Méthode

PARTICIPANTS

21 élèves (âge moyen : 8 ans) de la classe de CE2 de l'école Georges Lapierre à Lyon ont participé à cette expérience.

MATÉRIEL

Une nouvelle version de AMBRE-add a été installée sur les ordinateurs de la salle informatique de l'école. Dans cette version, les messages d'erreurs et d'explications ont été modifiés. Les problèmes présentés par le logiciel étaient les problèmes présentés aux élèves de CE1 adaptés pour les élèves de CE2 (Annexe 13) : les valeurs étaient plus élevées et les calculs à réaliser plus difficiles.

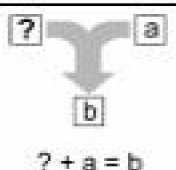
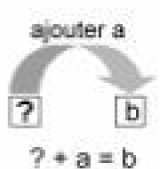
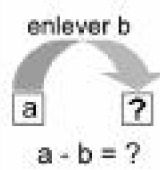
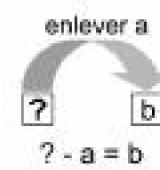
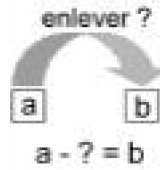
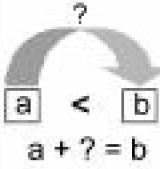
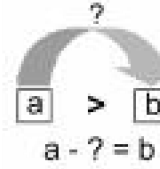
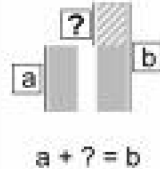
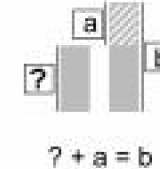
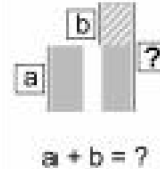
Catégorie réunion			
Catégorie changement Opérateur "ajouter"			
Catégorie changement Opérateur "enlever"			
Catégorie changement Opérateur inconnu			
Catégorie comparaison			

Tableau 9 : classes de problèmes proposées par AMBRE-add dans cette expérience

Le nombre de séances ne permettant pas de présenter toutes les classes de problèmes, nous avons choisi de ne présenter que les classes de problèmes les moins faciles (Tableau 9).

Durant l'utilisation, les traces d'interaction étaient enregistrées par le logiciel. Les questions des élèves et les interventions des encadrants étaient consignées sur une fiche d'observation. Une fiche d'observation individuelle (Annexe 11) était également utilisée pour consigner les observations relatives à l'utilisation du logiciel par un élève. L'observation individuelle avait pour objectif de décrire les activités des élèves lors des différentes étapes ainsi que leur utilisation de l'aide et du diagnostic.

En complément de ces observations, nous avons proposé un questionnaire de satisfaction (cf. Annexes 14) comprenant des questions de satisfaction, mais aussi des questions orientées sur les difficultés ressenties par les apprenants, l'utilisation de l'aide et du diagnostic et la compréhension du vocabulaire utilisé dans le logiciel.

Enfin, le test de compréhension des schémas (présenté dans l'expérience

précédente) a été proposé (Annexe 12).

DÉROULEMENT DES SÉANCES

Les élèves venaient en salle informatique par demi-classe durant 45 minutes pour utiliser le logiciel.

La première séance était consacrée à la prise en main du logiciel. Une démonstration partielle de l'utilisation de AMBRE-add était d'abord faite à l'aide d'un vidéoprojecteur par une encadrante. Ensuite, pendant les 25 minutes restantes, les élèves utilisaient le logiciel.

Durant cette première séance, un problème-type représentatif de chaque catégorie (réunion, changement, comparaison) était présenté. Durant les séances suivantes, les élèves utilisaient par eux-mêmes le logiciel durant toute la séance. La séance 2 était consacrée aux problèmes de changement, la séance 3 présentait des problèmes de changement et de comparaison. La séance 4 présentait des problèmes de la classe changement avec opérateur inconnu mélangés à des problèmes appartenant à d'autres classes.

Pendant que les élèves utilisaient le logiciel, les deux encadrantes répondaient aux questions et observaient la manière dont le logiciel était utilisé par les apprenants. Au cours de la dernière séance, les encadrantes ont interrogé certains élèves en leur demandant de décrire comment ils répondaient à l'étape d'adaptation et plus précisément s'ils utilisaient la reformulation et le problème-type. Cette séance a été conclue par le remplissage du questionnaire de satisfaction et par la tâche de compréhension des schémas (écriture d'un problème correspondant au schéma proposé).

11.3.2. Résultats

Durant l'expérience, tous les élèves ont été observés individuellement au moins une fois ; cinq élèves ont été observés durant la deuxième séance et neuf élèves ont été observés lors de chaque séance suivante. Lors de la dernière séance un élève était absent ; seuls vingt élèves ont donc répondu au questionnaire et au test de compréhension des schémas.

Plutôt que de présenter séparément les résultats des observations, des traces d'interaction et du questionnaire, nous avons choisi de croiser ces différents résultats suivant les dimensions d'analyse que nous avons retenues. Ainsi, après avoir présenté les caractéristiques des participants, nous présenterons d'abord les activités réalisées par les apprenants au cours des différentes étapes du cycle AMBRE. Ensuite nous aborderons l'utilisation du système d'aide et de diagnostic et la compréhension générale du principe de AMBRE à travers l'étude de la compréhension du vocabulaire. Finalement, nous présenterons les résultats du test de compréhension des schémas.

LES PARTICIPANTS

D'après le questionnaire, tous les élèves sont familiers de l'utilisation d'un ordinateur et 85% d'entre eux l'utilisent au moins une fois par semaine (essentiellement pour faire des

jeux). Douze élèves aiment beaucoup les mathématiques, trois n'aiment pas du tout et cinq ont une réponse neutre.

UTILISATION DU LOGICIEL AMBRE-ADD

D'après le questionnaire, les élèves considèrent que AMBRE-add est facile et agréable à utiliser (seuls deux élèves l'ont trouvé difficile ou ennuyeux).

Durant la première séance de prise en main, les élèves ont posé des questions relatives à la navigation et à la compréhension des consignes. Pour la plupart d'entre eux, cette première séance a semblé suffisante pour prendre en main le logiciel. En effet, durant les séances suivantes, la majorité des élèves étaient très autonomes et ne demandaient de l'aide que lorsqu'ils éprouvaient de grosses difficultés pour résoudre le problème.

Activités réalisées par les apprenants dans les différentes étapes du cycle AMBRE

La description de l'activité réalisée au cours des différentes étapes présentée ci-dessous ne s'appuie que sur les séances 2, 3 et 4 (pas sur la séance de prise en main du logiciel).

Tout d'abord, il est à noter que le temps passé à étudier les problèmes-types (en moyenne 1 minute 45 pour étudier 3 problèmes) est peu élevé et diminue de séance en séance (environ 2 minutes lors des séances 2 et 3 et 1 minute lors de la séance 4). Le temps passé à lire le bilan (en moyenne 25 secondes) est également très faible. Après avoir vu les problèmes-types, les élèves résolvent en moyenne 3,1 problèmes par séance en passant en moyenne 10 minutes par problème.

Nous allons par la suite résumer les différentes observations recueillies étape par étape. Si l'observation ne nous permet pas de donner des informations de nature quantitative, elle permet néanmoins d'identifier les différents types de comportements et d'activités ainsi que les principales difficultés rencontrées durant l'utilisation du logiciel.

- **Reformulation.** Dans cette étape, il est d'abord nécessaire de choisir un schéma. Si certains élèves choisissent d'emblée le bon schéma, beaucoup font d'abord un mauvais choix : ils choisissent au hasard, essaient d'utiliser le schéma utilisé dans l'exercice précédent ou se trompent. Cependant, une partie de ces élèves sont capables de réviser leur choix sans intervention du système de diagnostic : en essayant de compléter le schéma, ils reviennent sur leur choix et identifient souvent le bon schéma. Par ailleurs, suivant les catégories de problèmes, l'identification de la place de l'inconnue pose parfois des difficultés.
- **Choix d'un problème-type.** Les élèves réussissent facilement et très rapidement cette étape. La plupart d'entre eux choisissent le problème-type en appariant la reformulation du problème à résoudre avec l'une des reformulations des problème-types. Certaines erreurs sont commises car la place de l'inconnue n'est pas toujours prise en compte. Il est à noter que quatre élèves choisissent systématiquement le problème-type par essai-erreur sans porter d'attention aux

problèmes-types à choisir (l'un de ces élèves a déclaré dans le questionnaire avoir trouvé cette étape difficile et ne rien y comprendre).

- **Adaptation.** Dans cette étape, l'activité prescrite consiste à adapter la solution du problème-type pour résoudre le problème en cours. Pour savoir si l'activité effective correspondait à l'activité prescrite, nous avons demandé aux élèves comment ils construisaient la solution. D'après les entretiens et le questionnaire, 77 % des élèves se réfèrent au problème-type et/ou à la reformulation du problème (problème-type : 47%, reformulation : 37%).

Par ailleurs, l'observation a permis d'identifier les difficultés des élèves. Ainsi, ils éprouvent des difficultés à écrire l'équation correspondant au problème. En effet, ils ont souvent tendance à vouloir écrire directement l'opération à effectuer sans écrire l'addition à trou correspondant au problème. Ensuite, ils n'ont que peu de difficultés pour calculer la solution et la phrase réponse.

Il est à noter que d'après le questionnaire, cette étape est considérée comme la plus difficile ; elle occasionne parfois des signes d'irritations (exclamations, soupirs, etc.).

- **Classement.** Cette étape ne pose pas de difficultés (hormis des problèmes liés à l'ergonomie de l'interface). Le bilan du problème n'a été lu que par une petite partie des élèves, et uniquement lors de la résolution des premiers problèmes. Le choix du problème-type est fait très rapidement en se basant sur les reformulations des problèmes.

Aide et diagnostic

D'après le questionnaire, les élèves n'éprouvent pas de difficulté à lire les messages d'aide et de diagnostic. Cependant, même si 88% des élèves disent bien les comprendre, seuls 50% disent avoir été aidé par ces messages. Face au diagnostic automatique, l'observation montre une grande variabilité interindividuelle : une partie des élèves lisent attentivement les messages et en tiennent compte pour corriger leur réponse, tandis que d'autres ne les lisent que lorsque le même message revient plusieurs fois ; enfin, certains ne les lisent jamais et modifient leur réponse aléatoirement. Enfin, il est à noter que la moitié des élèves déclarent faire parfois appel au diagnostic eux-mêmes afin de vérifier leur réponse.

COMPRÉHENSION DU VOCABULAIRE

D'après le questionnaire, le vocabulaire utilisé dans le logiciel est bien compris. Pourtant lorsqu'il est demandé aux apprenants de localiser sur la fenêtre de l'étape d'adaptation le problème-type et la reformulation (le « modèle » et la « réécriture du problème »), 61% des élèves savent identifier « le modèle », mais seuls 41 % savent identifier la « réécriture » du problème. Le vocabulaire spécifique à l'interface n'est donc pas très bien assimilé.

Il est à noter que ce sont les mêmes élèves qui passent sur les problèmes-types sans les lire, choisissent systématiquement le schéma au hasard, choisissent le problème-type

par essai-erreur et ne lisent pas les messages de diagnostic.

COMPRÉHENSION DES SCHÉMAS

Nous avons demandé aux élèves d'écrire un problème correspondant à un schéma complété donné. Comme dans l'expérience précédente, nous avons classé les réponses en fonction des trois catégories de problèmes et d'une catégorie autre. Nous avons synthétisé ces réponses dans le tableau ci-dessous.

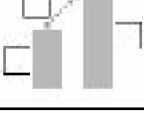
	réunion	changement	comparaison	autre	total
Annexe 4. 	7	6	2	5	20
Annexe 5. 	0	14	1	5	20
Annexe 6. 	0	7	3	9	19
total	7	27	6	19	59

Tableau 10 : Nombre de réponses produites pour chaque schéma classées par catégorie

D'abord, il est à noter que les élèves produisent surtout des problèmes de la catégorie changement quel que soit le schéma présenté. Cette catégorie est la plus rencontrée durant la scolarité, ce qui peut expliquer ce résultat. 7 élèves sur 20 ont produit un énoncé correct lorsque le schéma de réunion était présenté, mais seulement 3 ont produit un énoncé correct pour le schéma de comparaison. Enfin, 14 enfants sur 20 ont écrit un énoncé correct pour la catégorie changement. Cependant, seuls 5 élèves proposent un énoncé de cette catégorie uniquement pour le schéma correspondant. Enfin il faut noter que sur 20 enfants ayant réalisé le test, seuls 2 ont produits des énoncés de la catégorie attendue pour les trois schémas. Même s'ils se servent de la reformulation sous forme de schéma pour choisir le problème-type et dans certains cas pour écrire l'équation correspondant au problème, les élèves ne semblent pas avoir bien compris les trois schémas utilisés.

11.3.3. Discussion

Cette expérience avait pour but d'observer si AMBRE-add était adapté pour des enfants de CE2 et si l'utilisation effective du logiciel par les élèves de ce niveau était conforme à l'utilisation prescrite.

L'observation montre d'abord que, contrairement aux élèves de CE1, les élèves de CE2 n'ont pas eu de difficultés à lire et à comprendre les consignes et les messages d'aide et de diagnostic ou à mettre en œuvre des techniques opératoires. De plus, ils sont très autonomes, ils prennent en main le logiciel rapidement et mettent moins de temps que les élèves de CE1 pour résoudre un problème.

L'observation de l'utilisation du système a permis de mettre en évidence des différences interindividuelles importantes. La plupart des élèves cherchent activement la bonne réponse et, même s'ils éprouvent des difficultés, ils sont parfois capables de se rendre compte sans l'aide du système que certains choix doivent être modifiés (particulièrement dans l'étape de reformulation). Lors de l'étape d'adaptation, ils utilisent le problème-type ou la reformulation pour construire la résolution du problème (la moitié des élèves adaptent la solution du problème-type, un tiers utilise la reformulation). Enfin, ils savent utiliser les outils ou indications mis à leur disposition (diagnostic à la demande, outil rouge-vert). Par contre, quelques élèves (quatre dans cette expérience) passent les problèmes-type sans les lire et répondent en appliquant dès que possible une stratégie par « essai-erreur » : ils essaient de tirer profit du système de diagnostic du logiciel ; ils jouent avec le système (« playing the system », Baker, Corbett et Koedinger, 2004). Ce comportement passif bien connu dans le domaine des EIAH (par exemple décrit par Mostow et al., 2002) est corrélé négativement avec l'apprentissage (Baker, Corbett et Koedinger, 2004). Il est nécessaire de le détecter (voir par exemple le modèle proposé par Baker, Corbett et Koedinger, 2004) afin de le prévenir s'il est très répandu ou de prévoir une remédiation (nous pensons à limiter l'accès à l'aide et au diagnostic si une utilisation abusive est détectée).

Par ailleurs, certaines difficultés existent pour tous les élèves. Ils ne maîtrisent pas bien le vocabulaire utilisé dans le logiciel, ce qui peut poser des problèmes par exemple pour comprendre les messages d'aide et de diagnostic. De plus, même s'ils se servent des schémas pour choisir le problème-type ou pour construire la solution du problème, ils ne semblent pas vraiment les comprendre, même après quatre séances d'utilisation du logiciel. Enfin, quelques élèves disent ne pas savoir à quoi peut servir le problème-type ou la reformulation.

Ces résultats sont encourageants et permettent de considérer que AMBRE-add est adapté à ces élèves.

11.4. Bilan des expériences et perspectives

Nous avons conduit 3 expériences afin d'évaluer l'utilisabilité du système et son impact sur l'apprentissage de la méthode. La première expérience, réalisée en laboratoire avec cinq apprenants, a permis d'identifier les plus gros problèmes d'utilisation et de modifier le logiciel avant l'expérimentation en classe

La seconde expérience s'est déroulée avec 78 élèves de CE1, à l'école, dans des conditions écologiques. Cette expérience consistait à comparer AMBRE-add avec deux logiciels contrôles. Cette expérience n'a pas permis de mettre en évidence un impact du cycle AMBRE sur l'apprentissage de la méthode. Nous avons avancé trois différentes explications. D'abord la validité de la comparaison entre AMBRE-add et le logiciel contrôle résolution simple est remise en cause par des difficultés d'ordre méthodologique. En effet, le nombre de problèmes résolus et le type d'interventions des encadrants ont varié suivant le logiciel utilisé. De plus, les apprenants ont rencontré de nombreuses difficultés lors de l'utilisation du logiciel. Ces difficultés étaient dues à un manque de maîtrise de la lecture (difficultés à lire l'énoncé et les messages d'aide et de diagnostic) et des

techniques calculatoires, mais aussi à la complexité du système (difficultés pour situer leurs erreurs ou pour comprendre le lien entre les différentes étapes). Enfin, les élèves n'ont pas utilisé le logiciel comme nous l'attendions ; les activités proposées ne les conduisent donc pas à mettre en œuvre des processus de généralisation.

Cette expérience nous a conduit à modifier les messages d'aide et de diagnostic proposés par le système et à identifier un public pour lequel AMBRE-add serait plus adapté. Pour cela, nous avons conduit une expérience auprès d'élèves en classe de CE2 consistant à observer l'utilisation effective du logiciel. Cette expérience a d'abord montré que les élèves de CE2 étaient plus autonomes dans l'utilisation du logiciel, le prenaient en main plus rapidement et résolvaient plus rapidement les problèmes. Par ailleurs, l'observation permet de penser qu'une partie des apprenants plus importante qu'en CE1 a eu une utilisation du logiciel plus proche de celle prescrite.

A travers ces différentes expériences nous avons donc précisé les pratiques et les difficultés des élèves de CE1 et CE2 face au logiciel, ce qui nous a permis d'identifier un public pour lequel AMBRE-add pourrait être bien adapté. Nous avons également produit des recommandations qui ont conduit à améliorer le logiciel.

Nous envisageons maintenant de mener une nouvelle expérience avec plusieurs classes de CE2 afin de mesurer l'impact de AMBRE-add sur l'apprentissage. Compte tenu du temps nécessaire pour construire une maquette contrôle valide, nous allons dans un premier temps faire une expérience pour s'assurer que AMBRE-add a bien un impact sur l'apprentissage. Si cette hypothèse est vérifiée, nous réaliserons une évaluation comparative afin de mesurer plus précisément l'impact du cycle AMBRE sur l'apprentissage.

Chapitre 12 : Discussion de la seconde partie

Dans cette seconde partie, nous avons présenté notre apport à la conception d'Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) dans le cadre du projet AMBRE. Les EIAH conçus dans le cadre de ce projet ont pour but de faciliter l'apprentissage à partir d'exemples en guidant l'apprenant à travers les étapes du Raisonnement à Partir de Cas (RàPC) (cycle AMBRE). Au sein de ce projet, notre rôle consistait à s'assurer que l'approche proposée favorise bien l'apprentissage.

Notre participation au projet s'est déroulée en plusieurs étapes. Nous avons d'abord explicité les activités proposées dans chaque étape du cycle AMBRE et les processus de généralisation que les apprenants devraient mettre en œuvre dans cette étape. Puis nous avons produit différentes recommandations afin de spécifier les conditions qui facilitent la mise en œuvre de différents processus de généralisation. Ces recommandations sont de différentes natures ; elles portent sur le contenu des consignes, la manière de présenter les problèmes-types, les traits de surfaces des problèmes-types et des problèmes à résoudre, ou encore sur le diagnostic. Ces recommandations portent également sur l'ajout d'outils facilitant la comparaison.

Ensuite, nous avons participé à l'équipe de conception de l'EIAH AMBRE-add, un EIAH pour enseigner des méthodes dans le domaine des problèmes additifs. Puis nous avons évalué l'utilisabilité de AMBRE-add et son impact sur l'apprentissage à travers différentes expériences.

Dans ce chapitre, nous allons résumer les différents résultats obtenus et discuter des conditions qui peuvent favoriser ou non l'apprentissage de méthodes. Nous reviendrons d'abord sur les résultats des évaluations ; à partir des observations, nous caractériserons l'utilisation effective du logiciel et les difficultés persistantes. Puis nous ferons différentes propositions pour dépasser ces difficultés. Ensuite, nous discuterons du rôle des théories et données empiriques issues des études sur l'apprentissage à partir d'exemples pour la conception du projet AMBRE. Nous verrons ensuite quelles conséquences nous pouvons tirer de ce travail pour le projet AMBRE. Finalement, nous discuterons de la démarche à adopter pour évaluer un EIAH dans le cadre d'une conception itérative.

12.1. Conséquences de l'évaluation pour AMBRE-add

Notre objectif était de montrer que le principe de AMBRE a un effet sur l'apprentissage. Pour cela, nous avons mené une évaluation comparative. Celle-ci n'a pas permis de mettre en évidence un effet du cycle AMBRE sur l'apprentissage ; l'utilisation de AMBRE-add est associée à un progrès en résolution de problème, mais ce progrès n'est pas supérieur à celui obtenu dans les conditions contrôles.

Néanmoins, cette étude ainsi que l'observation de l'utilisation du logiciel en classe de CE2 nous ont permis de mettre en évidence les plus grosses difficultés rencontrées durant d'utilisation du système et nous ont conduites à reconsidérer le public visé pour utiliser le système. En effet, le système semble trop compliqué pour des élèves de CE1 ; il semble plus adapté pour des élèves en classe de CE2, plus autonomes et meilleurs lecteurs.

Enfin, l'observation des élèves utilisant le logiciel au cours de ces différentes expériences nous a apporté de nombreuses informations sur l'utilisation effective de l'environnement, parfois assez différente de l'utilisation prescrite.

Dans cette section, nous allons d'abord rappeler les données obtenues sur l'utilisation effective du logiciel en la comparant à l'utilisation prescrite. Ensuite, nous discuterons des difficultés qui persistent encore et des différentes possibilités envisageables pour y remédier.

12.1.1. Utilisation effective versus utilisation prescrite

L'utilisation effective de AMBRE-add en classe de CE1 a été assez différente de l'utilisation attendue. En effet, les apprenants ont eu des difficultés à lire les consignes, à lire les messages de diagnostic, à identifier où se situaient leurs erreurs, à faire les calculs, etc. Ces nombreuses difficultés ont sans doute été nuisibles à la compréhension et à la maîtrise du principe du logiciel. Il semble que le logiciel soit plus adapté aux élèves en classe de CE2 ; en effet, ceux-ci étaient plus autonomes, maîtrisaient mieux la lecture et le calcul, et ont éprouvé beaucoup moins de difficultés que les élèves de CE1 lors de

l'utilisation du logiciel. Dans cette section, nous décrivons donc essentiellement l'utilisation effective des élèves de CE2 en la comparant à l'utilisation prescrite.

Durant l'analyse des exemples, nous nous attendions à ce que les élèves s'auto-expliquent les exemples ou mettent en œuvre un raisonnement anticipatif. Or d'après les traces d'interaction, les élèves de CE2 n'ont passé que très peu de temps sur les exemples, ce qui ne nous a pas permis d'identifier une activité ou un raisonnement particulier sur ces exemples. Les exemples présentés étaient probablement trop faciles par rapport au niveau des élèves. Il est à noter qu'en CE1, les exemples présentés étaient plus difficiles pour leur niveau ; un raisonnement anticipatif avait été observé chez certains élèves.

Lors du bilan des problèmes-types, nous attendions une activité de comparaison des problèmes. Si, lors des premières séances, certains apprenants prenaient le temps d'observer et de lire les différents problèmes, il passaient ensuite très rapidement sur cette étape (à la dernière séance, le temps moyen de 16s la dernière séance). L'étape de bilan ne remplit donc pas exactement son rôle.

Ensuite, les apprenants devaient résoudre des problèmes. Dans l'étape de reformulation, d'après l'utilisation prescrite, les apprenants devaient expliciter les éléments pertinents pour la résolution. L'observation montre que, s'ils ont été conduits à s'interroger sur l'énoncé, ils ont aussi éprouvé des difficultés à identifier le bon schéma et la place de l'inconnu. Toutefois, certains d'entre eux ont été capables d'identifier eux-mêmes leurs erreurs et de les corriger. Cette étape remplit donc bien son rôle pour une partie des élèves, même s'il faut noter que les schémas eux-mêmes n'étaient pas bien maîtrisés à l'issue des quatre séances.

L'étape de choix d'un problème-type visait à comparer le problème à résoudre aux différents problèmes-types et à choisir celui qui se résout de la même façon. Les apprenants répondaient très vite dans cette étape, en appariant les schémas, sans tenir compte des énoncés. Ils ne comparaient donc pas réellement le problème à résoudre aux autres problèmes, mais recherchaient plutôt des similarités perceptives entre les différents schémas.

Dans l'étape d'adaptation, les apprenants devaient adapter la solution du problème-type pour construire la solution du problème à résoudre. D'après l'interview et le questionnaire, 47% des élèves de CE2 utilisaient le problème-type dans l'étape d'adaptation. Ces élèves étaient donc susceptibles de mettre en œuvre un processus de généralisation par adaptation. Parmi l'autre moitié d'élèves, 37% utilisaient la reformulation du problème pour le résoudre. *Il serait intéressant d'étudier si l'utilisation du problème-type pour construire la solution améliore plus l'apprentissage que l'utilisation de la reformulation.*

Enfin, l'étape de classement visait à ranger le problème en l'associant avec le problème-type représentatif de la classe et ainsi construire un groupe de problèmes isomorphes (ayant la même structure). Si les apprenants réalisaient sans difficulté cette étape en s'appuyant sur les similarités perceptives des schémas, il est peu probable qu'ils aient été conscients qu'ils construisaient des groupes de problèmes. En effet, étant donné le nombre de classes, en quatre séances ils ne rencontraient que très peu de problèmes

appartenant à la même classe. De plus, ils n'avaient pas de possibilité de visualiser simultanément les différents groupes de problèmes construits.

En résumé, dans plusieurs étapes, les apprenants ne réalisent pas l'activité prescrite ; en particulier, il semble qu'ils ne réalisent pas les activités de comparaison lors du bilan des problèmes-types, de l'étape de choix d'un problème-type ou de classement. Il est à noter que dans ces trois étapes, la consigne demande aux apprenant de produire une activité « mentale » (comparer), mais paradoxalement, la tâche à réaliser (la réponse à produire) pour passer à l'étape suivante est très simple. Dans le bilan, il n'y a pas de réponse à produire, l'apprenant peut passer à l'étape suivante quand il le souhaite et dans les étapes de choix d'un problème-type et de classement, l'apprenant doit sélectionner le bon problème-type et passer à la suite, ce qu'il peut faire par essai-erreur.

Néanmoins, au cours de l'utilisation du logiciel, une partie des élèves de CE2 réalisent plusieurs activités susceptibles de conduire à la mise en œuvre de processus de généralisation (raisonnement anticipatif lors de l'analyse des exemples, recherche des éléments pertinents pour la résolution, adaptation).

12.1.2. Des difficultés persistantes

Les différentes évaluations nous ont conduit à éliminer les plus grosses difficultés et à identifier un public pour lequel AMBRE-add est approprié, les élèves de CE2. Néanmoins des difficultés persistent. La première difficulté identifiée concerne la compréhension des schémas utilisés pour représenter le problème. Peu d'apprenants semblent les avoir compris. En effet, d'après les observations, les élèves ont des difficultés pour construire la reformulation du problème (nous reviendrons sur cette difficulté ultérieurement). De plus, la plupart des élèves de CE2 ne sont pas capables de construire des énoncés correspondant aux différents schémas. Ce test montre donc qu'ils n'ont pas une connaissance explicite de la signification des différents schémas. Néanmoins, ce test étant assez faisant appel à des compétences langagières différentes de la compréhension des schémas, il est possible que certains apprenants possèdent des connaissances sur les schémas sans être capable de les expliciter. La compréhension des schémas est un élément central pour l'utilisation de AMBRE-add car ceux-ci permettent de construire la reformulation du problème, de sélectionner un problème-type, de classer le problème ou encore de construire l'équation correspondant au problème. La non compréhension des schémas peut donc perturber la réalisation des différentes activités proposées par le système. *Il est donc essentiel d'améliorer leur compréhension pour que les apprenants puissent bénéficier de l'utilisation de AMBRE -add.*

Les difficultés observées durant l'étape de reformulation peuvent également avoir une autre origine : les apprenants ont des difficultés à comprendre quelle erreur ils ont commise et comment la corriger. Nous avons modifié les messages de diagnostic en précisant les sous-étapes réussies avant d'indiquer l'erreur ; mais ces modifications n'ont pas entièrement permis de supprimer cette difficulté. Il semble que les apprenants ne fassent pas la relation entre le vocabulaire utilisé dans les explications proposées par le système et les différents éléments d'interface. *Outre les difficultés de vocabulaire, il serait également intéressant d'évaluer l'impact des messages d'explications en étudiant les*

différentes actions des apprenants après l'apparition d'un message, par exemple en analysant les traces d'interaction (Renkl, 2002).

Enfin, comme nous l'avons décrit chapitre 5, quelques apprenants (plus nombreux en CE1 qu'en CE2) utilisent le logiciel très différemment de l'utilisation prescrite ; ils « jouent avec le système » (« playing the system », Mostow et al., 2002). Ils passent les problèmes-type et le bilan sans les lire, en ne tiennent aucun compte des explications données par le diagnostic et suivent une stratégie d'essai-erreur pour répondre et passer aux étapes suivantes. Ce comportement est particulièrement observé dans les étapes de choix d'un problème-type et de classement dans lesquelles l'activité prescrite est essentiellement une activité « mentale », la tâche à réaliser étant relativement simple (tâche de sélection parmi un ensemble restreint d'éléments). Ce comportement peut être interprété comme un manque de motivation ou un manque d'implication des apprenants dans l'activité. D'après Baker, Corbett et Koedinger (2004), ce comportement est corrélé négativement avec l'apprentissage. *Dès lors, il nous faut estimer sa distribution et sa fréquence afin de choisir une stratégie adaptée pour l'éviter ou y remédier. Si ce comportement est pratiqué ponctuellement par quelques apprenants isolés, nous pourrions prévoir une remédiation, par exemple en limitant l'accès à l'aide et au diagnostic ou en envisageant un appel au tuteur présent dans la salle. En revanche, s'il est très répandu, il faudrait repenser l'interaction avec le système.*

Ces différentes difficultés soulèvent d'une part la question de l'appropriation du système par l'apprenant (1) et d'autre part la question de l'implication dans l'activité proposée par le logiciel (2).

(1) Pour s'approprier AMBRE-add, les apprenants doivent à la fois comprendre les activités proposées, les modes d'interactions possibles avec le logiciel, mais aussi la signification des schémas et du vocabulaire spécifique. Il nous semble donc nécessaire d'accompagner cette appropriation. Pour pallier aux difficultés de compréhension des schémas et du vocabulaire, l'équipe du projet AMBRE travaille sur la conception d'un nouveau tutoriel destiné à faciliter la prise en main du logiciel. Celui-ci présente les schémas d'une manière plus claire et conduit les apprenants à identifier les différents éléments d'interface à travers une interaction avec le logiciel. Après cette première prise de contact avec le logiciel, il nous semble important d'accompagner le processus de genèse instrumentale (Rabardel, 1995). En effet, au cours de l'usage d'un dispositif informatique, chaque utilisateur s'approprie le dispositif en s'adaptant aux contraintes imposées par le dispositif et ses fonctions constitutives (instrumentation), mais aussi en attribuant des fonctions à cet artefact non prévues lors de la conception (instrumentalisation). Si cette genèse est inhérente à la prise en main d'un logiciel, il semble possible de l'orienter en organisant les activités individuelles ou celles de la classe à travers une « orchestration instrumentale » (Trouche, 2002). Celle-ci suppose « l'interaction entre les différents sujets, l'explicitation des démarches et la publication des traces de l'activité » (Trouche, 2002, p.272).

(2) il nous semble par ailleurs important de prendre davantage en considération la question de la motivation et de l'implication de l'apprenant. En effet, comme le soulignent Soloway et al. (1996), contrairement à des utilisateurs qui utilisent un système informatique en situation professionnelle, en situation scolaire l'engagement des

apprenants dans l'activité ne va pas de soi. Actuellement, les thèmes de la motivation et de l'implication des apprenants font l'objet de différentes recherches dans le domaine des EIAH (voir par exemple les actes du workshop « Social and Emotional Intelligence in tutoring systems, Mostow et Tedesco (eds.), 2004). Certaines études suggèrent d'avoir recours à un avatar pour délivrer les messages d'aide et d'explication afin de rendre le système plus convivial et plus attrayant (voir par exemple Frasson, 1998). D'autres études proposent de détecter le niveau de motivation de l'apprenant afin de le stimuler s'il baisse (Beck, 2004). Ainsi, dans le projet AMBRE, nous pourrions nous inspirer de ces études afin de proposer une forme d'interaction qui facilite l'implication dans la tâche (par exemple en introduisant un avatar animé qui exprime oralement les messages d'aide et de diagnostic) ainsi que pour détecter le désengagement des apprenants.

Par ailleurs, nous pensons qu'il est possible d'apporter une réponse plus globale aux difficultés d'appropriation du logiciel et d'implication dans la tâche à travers la proposition d'un scénario pédagogique.

12.1.3. Proposition d'un scénario pédagogique

De notre point de vue, certaines difficultés liées à l'appropriation du logiciel et à l'implication des apprenants dans l'activité pourraient être atténuées si l'utilisation du logiciel était intégrée aux activités de la classe. Pour faciliter et guider cette intégration, nous proposons un scénario pédagogique (Gregori, Hautecouverture, Godart et Charoy, 2004) qu'un enseignant pourrait ensuite adapter à sa pratique.

ENLEVER ICI LES CONDITIONNELS

Avant que les élèves utilisent AMBRE-add, il nous semble important qu'un travail préalable soit fait en classe afin d'introduire les schémas utilisés dans le logiciel ; nous pensons que les élèves auront moins de difficultés à intégrer cette représentation si elle est proposée par l'enseignant. Ce travail pourrait s'appuyer sur un « kit » de prise en main proposant des activités destinées à faciliter la compréhension des schémas (cette démarche a déjà été adoptée dans d'autres projets pour améliorer l'accessibilité du logiciel (Gregori et al., 2004)). Au cours de cette séance préparatoire, l'enseignant pourrait également présenter aux élèves l'intérêt de la démarche proposée dans AMBRE-add, qui consiste non pas à calculer la solution immédiatement, mais à représenter autrement le problème, puis à rechercher un problème proche déjà rencontré avant d'en calculer la solution.

Ensuite, la première séance d'utilisation du logiciel doit être dévolue à sa prise en main. Le tutoriel en cours d'élaboration pourra permettre à l'apprenant de découvrir l'environnement. Après cette phase de découverte, il nous paraît important de prévoir une orchestration instrumentale (Trouche, 2002) afin d'orienter la manière dont les apprenants s'approprient le logiciel. On peut imaginer que les élèves résolvent un premier problème en étant deux par ordinateur afin de s'entraider pour comprendre le principe de AMBRE, puis qu'un problème soit résolu par un élève « sherpa » (dont la résolution serait suivie par toute la classe) qui expliciterait sa démarche et qui pourrait être aidé par l'encadrant de la séance. Cette proposition est à tester pour voir dans quelle mesure elle peut être réalisable et si elle conduit à des résultats satisfaisants.

Après cette première séance d'utilisation, les élèves doivent utiliser le logiciel individuellement pendant plusieurs séances. Les expériences menées jusqu'ici ne nous ont pas permis de déterminer le nombre « idéal » de séances d'utilisation du logiciel ou le rythme d'utilisation idéal. Quatre séances assez rapprochées nous semblent cependant être une durée minimum d'utilisation pour s'approprier le logiciel et bénéficier de son utilisation. Durant ces séances d'utilisation, il nous semble important qu'un tuteur soit présent afin de répondre aux questions, de rassurer et de débloquer les élèves en impasse et de conduire les élèves passifs à s'impliquer d'avantage dans l'activité. Après quelques séances, il pourrait être intéressant que l'enseignant mène une discussion collective en classe sur l'utilisation de AMBRE-add afin de permettre aux apprenants d'avoir une réflexion sur leurs stratégies et leurs difficultés, et afin de faire le lien entre les activités réalisées avec le logiciel et les activités effectuées en classe.

Ce scénario pédagogique est une première proposition issue des observations en classe, il serait maintenant nécessaire d'en discuter avec des enseignants et d'observer la manière dont il est mis en place. Les retours positifs des enseignants dont les classes ont participé aux évaluations nous laisse supposer que cette intégration est possible. En effet, ceux-ci ont considéré que AMBRE-add était complémentaire aux activités de découverte proposées en classe, ils ont apprécié la diversité des classes de problèmes et des habillages présentés par le logiciel, et ont demandé à l'utiliser en complément de leurs activités en classe.

Par ailleurs, pour faciliter l'intégration du logiciel en classe, l'équipe du projet AMBRE a travaillé sur un module pour l'enseignant (Duclosson, Jean-Daubias et Riot, 2005). Ce module doit permettre à l'enseignant de préparer facilement une séance d'utilisation du logiciel en l'assistant dans la construction des problèmes présentés et en lui permettant de paramétrer le logiciel grâce à une interface simple à utiliser.

12.2. Rôle des théories et des données empiriques sur le fonctionnement cognitif pour la conception de ce projet ?

Dans l'introduction de cette partie, nous évoquons la nécessité de mieux comprendre les mécanismes d'apprentissage que possède l'apprenant afin de concevoir un EIAH en adéquation avec les besoins de l'apprenant. Mais quel rôle les théories et données empiriques sur le fonctionnement cognitif ont-elles réellement joué dans la conception du projet AMBRE ?

Dans un premier temps, ces études nous ont amenées à mieux définir quelles activités et quels processus de généralisation l'apprenant devrait mettre en œuvre à chaque étape du cycle. Ensuite, nous avons cherché à préciser les conditions qui pourraient faciliter la mise en œuvre de ces processus en s'appuyant sur des données empiriques (présentées dans la partie 1). Nous avons ainsi produit différentes recommandations destinées à orienter la manière de présenter les problèmes résolus, les caractéristiques des exemples et des problèmes présentés, ou encore certaines consignes. Nous avons par ailleurs proposé des outils complémentaires pour faciliter la comparaison des problèmes et la mise en correspondance entre le problème-type choisi

et le problème à résoudre.

Les recommandations proposées ont-elles eu l'effet attendu ?

Nous n'avons pas essayé d'évaluer l'effet des recommandations une par une. Néanmoins les différents résultats obtenus et les observations donnent quelques indications quant à la validité de certaines recommandations.

Par exemple, une première recommandation prescrivait de présenter les problèmes résolus de manière séquentielle afin d'inciter à mettre en œuvre un raisonnement anticipatif. D'après les observations faites en classe de CE1, la présentation séquentielle des problèmes-types a conduit certains apprenants à chercher la solution de l'étape suivante, et à mettre ainsi en œuvre un raisonnement anticipatif. Ce comportement a été moins fréquemment observé en CE2 ; les problèmes-types présentés, identiques à ceux présentés en CE1, étaient souvent considérés comme triviaux par les élèves. Une autre recommandation proposait de faire un bilan des problèmes-type déjà rencontrés afin d'inciter à les comparer. Lors de l'utilisation du logiciel, les apprenants ont accordé peu d'attention à ce bilan (temps moyen pour lire le bilan en CE2 : 25s). Dans l'étape de choix d'un problème-type, la consigne demandant de comparer le problème aux problèmes-types avant de choisir n'a pas été très suivie. Les apprenants lisaient peu les consignes (en raison de difficultés pour lire en CE1) et répondaient très rapidement en appariant la reformulation du problème à la reformulation du problème-type correspondant. En revanche l'outil destiné à faciliter la comparaison (en coloriant en vert les éléments communs au problème à résoudre et au problème sélectionné et en rouge les éléments différents) a effectivement facilité la comparaison des problèmes. Grâce à cet outil, les apprenants prenaient conscience du rôle de la place de l'inconnue et de l'opérateur dans le choix de la bonne reformulation. Par contre, dans l'étape d'adaptation, l'outil « coloré » devant faciliter l'appariement entre le problème-type et le problème dans l'étape d'adaptation n'a pas été utilisé. Lorsqu'il était activé par le système d'aide, la plupart des apprenants n'y prêtaient pas attention tandis que d'autres étaient perturbés par les couleurs. Les correspondances sous forme de couleur étaient sans doute trop compliquées et difficiles à comprendre. Même si ce type d'outil nous semble utile, il est en l'état difficilement utilisable par le public visé.

Cette évaluation indique des résultats mitigés. La plupart des recommandations visant à favoriser la comparaison entre les problèmes (le bilan, les consignes, l'outil coloré) n'ont pas eu l'effet attendu. Si les études théoriques montrent que la comparaison des problèmes favorise une détection de similitudes, nous avons eu des difficultés à proposer des activités médiées par le logiciel qui incitent efficacement l'apprenant à comparer les problèmes-types entre eux et le problème aux différents problèmes-types sans alourdir la résolution du problème. Par ailleurs, compte tenu du nombre d'activités et de possibilités de mettre en œuvre un processus de généralisation au cours des différentes étapes, il est possible que les apprenants ne cherchent pas à généraliser dans chaque étape, mais uniquement dans certaines activités proposées dans le cycle.

En outre, ces recommandations n'ont eu qu'un poids limité dans la conception. En effet, au cours de la conception, nous avons été confrontées à certains choix délicats pour lesquels les théories sur le fonctionnement cognitif ne pouvaient pas nous orienter. En

effet, dans le projet AMBRE si le principe est générique, les compétences et connaissances à acquérir sont directement dépendantes du domaine ; deux facteurs clés pour le bon fonctionnement du système, les explications et la reformulation, sont dépendants du domaine et ne sont pas définis par le principe général. Par exemple, le choix du niveau d'abstraction de la reformulation est guidé par des questions pratiques (comment représenter la reformulation dans l'interface pour qu'elle soit compréhensible, facilement construite, et réutilisable dans les étapes suivantes). Or le niveau d'abstraction de la reformulation est déterminant pour l'utilisation du logiciel. Si, comme dans le logiciel AMBRE-add, la reformulation demande un haut niveau d'abstraction, les apprenants risquent d'avoir plus de difficultés et d'avoir besoin de plus de temps pour s'approprier la représentation de la reformulation, ce qui pourrait limiter l'impact du principe de AMBRE sur l'apprentissage. Il est donc difficile d'évaluer la pertinence du principe général si des difficultés existent au niveau de la compréhension des explications et de la reformulation.

Ainsi, il semble que se centrer sur les processus apporte un certain nombre de réponses intéressantes mais ne soit pas suffisant, la prise en compte des connaissances étant également déterminante. Dans le logiciel AMBRE-add, nous avons complété ce manque en nous appuyant sur des études en didactique des disciplines spécialisées dans les connaissances en jeu dans le domaine des problèmes additifs. Nous avons adapté le cycle AMBRE et les différentes recommandations proposées au domaine de connaissances à acquérir, la résolution de problèmes additifs. Nous avons également travaillé en collaboration avec une conseillère pédagogique afin d'adapter le logiciel au public visé, les enfants de l'école primaire.

12.3. Quels enseignements tirer de ce travail pour le projet AMBRE ?

Un objectif majeur du travail réalisé dans le cadre du projet AMBRE était d'évaluer de l'impact du « cycle AMBRE » sur l'apprentissage. Pour ce faire, le principe de AMBRE a été implémenté dans le logiciel AMBRE-add. L'évaluation comparative de AMBRE-add réalisée en classe de CE1 n'a pas permis de mettre en évidence un impact du cycle AMBRE sur l'apprentissage de la méthode. Cette expérience n'a donc pas permis de valider le principe de AMBRE. Comme nous l'avons expliqué précédemment, ces résultats négatifs sont en partie dus à des problèmes méthodologiques. Néanmoins d'autres difficultés ont été mises en évidence. (1) Les apprenants ont des difficultés à reformuler le problème. (2) certains répondent par essai-erreur et ont des difficultés à s'impliquer dans l'activité. Par ailleurs, (3) les apprenants ont des difficultés à comprendre la signification des schémas et des messages d'explication.

(1) Si la difficulté de l'étape de reformulation peut être en partie expliquée par les difficultés de compréhension des schémas et du vocabulaire, on peut également être amené à s'interroger sur l'étape de reformulation elle-même. En effet, cette étape demande à l'apprenant de représenter autrement le problème en identifiant les éléments pertinents pour la résolution afin de faciliter la remémoration d'un problème de même catégorie que le problème à résoudre. Conformément à la conception classique du raisonnement par analogie, nous partageons la présupposition de Ross et Bradshaw (1994, p. 599, cité par Sander, 2000) selon laquelle « le problème (cible) est d'abord

compris et l'accès à une source et à son utilisation se produisent ensuite, alors que les individus essaient de trouver la solution à ce problème compris ». Cette présupposition est cependant paradoxale : « si l'analogie permet de comprendre l'inconnu dans les termes du connu, il est paradoxal d'imposer en même temps que l'inconnu soit déjà compris et ce avant même la réalisation de l'analogie. » (Sander, 2000, p. 47). Il semble en effet paradoxal de demander à des apprenants de représenter le problème en ne prenant en compte que les traits pertinents pour la résolution alors que nous savons qu'ils ont des difficultés à modéliser ce type de problème. Ainsi, si les éléments d'interface et les messages d'explication prévus pour guider la construction de la reformulation ne sont pas compris, il n'est pas surprenant que les apprenants procèdent par essai-erreur sans comprendre les schémas. A l'inverse, si les apprenants construisent correctement la reformulation du problème, l'étape de choix d'un problème-type conduit simplement à se remémorer un cas source, sans conduire à une généralisation de connaissances. Ainsi, deux visions du raisonnement par analogie sont mises en évidence ici. Selon la première approche, le problème est d'abord compris puis un problème source est remémoré uniquement afin de s'en aider pour identifier la technique de résolution adaptée au problème permettant de le résoudre. Selon une seconde approche, c'est en se remémorant un problème source que l'apprenant devient à même d'identifier les éléments pertinents pour la résolution et de résoudre le problème.

(2) Par ailleurs, nous avons observé que certains apprenants répondent par essai-erreur. Ces comportements sont particulièrement visibles dans les étapes de choix d'un problème-type et de classement, où la tâche à réaliser pour passer à l'étape suivante est simple (sélection d'un élément dans un ensemble restreint) et peut être réalisée avec peu de réflexion. Si ces comportements relèvent sans doute d'un manque de motivation ou d'implication dans la tâche, il nous semble possible de les limiter en modifiant le diagnostic réalisé dans ces étapes. Si aucun diagnostic n'est réalisé sur l'étape de choix du problème, l'apprenant devra se rendre compte lui-même si le problème-type qu'il a choisi peut être adapté ou non pour trouver la solution du problème à résoudre. Dans l'étape de classement, on pourrait laisser l'apprenant construire son propre classement des problèmes, puis après avoir résolu plusieurs problèmes de différentes classes, on pourrait lui permettre de modifier ce classement, dans une étape consistant à réorganiser les groupes de problèmes construits. Ces deux propositions faisaient partie des recommandations faites avant la conception de AMBRE-add. Cependant, elles ne nous ont pas paru adaptées au public visé par AMBRE-add. Elles nous semblent cependant toujours pertinentes et il serait intéressant de tester d'intégrer ces propositions à la conception d'un EIAH AMBRE destiné à un public moins jeune.

(3) Nous avons vu précédemment que les apprenants ont également des difficultés à comprendre les schémas, le vocabulaire utilisé dans l'interface et certaines explications proposées. Ces différents aspects sont dépendants du domaine d'application du logiciel. Ces limites sont-elles liées au domaine ou sont-elles liées au principe du projet ?

Il est en effet à noter que, dans le domaine des problèmes additifs, la classification des problèmes sur laquelle nous nous appuyons présente certaines limites : de plus en plus d'études viennent remettre en cause cette classification en identifiant de nombreuses sources de difficultés qu'elle ne prend pas en compte. De plus, suivant cette

classification, une même équation peut être associée à deux classes de problèmes différentes. Ainsi, si ces classes de problèmes présentent un réel intérêt aux premières étapes de l'apprentissage en ce qu'elles aident l'apprenant à se représenter correctement le problème, quand l'apprentissage est plus avancé, elles présentent un intérêt plus limité.

A ce stade du projet, il nous semble important de tester à nouveau l'impact du logiciel sur l'apprentissage auprès d'apprenants ayant d'autres caractéristiques et de concevoir un EIAH selon ce même principe dans un autre domaine. Nous pourrions ainsi préciser quelles sont les difficultés spécifiques au public ou au domaine, et quelles sont celles qui sont liées au projet.

Ceci nous amène donc à préciser ce que serait un bon domaine d'application pour le projet AMBRE. Tout d'abord, le domaine applicatif choisi doit comporter des problèmes bien définis que les apprenants ont du mal à modéliser. De plus, une classification de problèmes doit exister, avec une technique de résolution associée à chaque classe de problèmes. Les techniques de résolution doivent être bien différenciées et spécifiques à chaque classe. Enfin, les utilisateurs à qui est destiné le logiciel doivent avoir de bonnes capacités de lecture et de compréhension de consignes.

La conception d'un EIAH d'après le principe de AMBRE nécessite une collaboration avec des experts de l'enseignement du domaine afin de préciser la manière de reformuler les problèmes, les différentes erreurs typiques du domaine et le contenu des explications. De plus, la reformulation ainsi choisie doit être pertinente pour représenter les différentes classes de problèmes et compréhensible par l'apprenant.

Nous envisageons deux nouveaux domaines applicatifs : le domaine des statistiques et la conjugaison. En statistiques, les étudiants doivent déterminer quel test statistique utiliser en prenant par exemple en compte le nombre de variables et les caractéristiques des variables présentées dans l'énoncé. On peut ainsi différencier des classes de problèmes associés à des tests statistiques différents. Dans le domaine de la conjugaison, il existe des ensembles de verbes qui partagent des caractéristiques communes qui se conjuguent de la même façon. On peut supposer que le principe de AMBRE pourrait permettre aux apprenants de reconnaître à quel groupe ou « sous-groupe » de verbe appartient le verbe qu'il doit conjuguer et ainsi adapter la bonne terminaison.

12.4. Quels enseignements pour l'évaluation des environnements d'apprentissage ?

« There can be no doubt that evaluating ITS is costly, frustrating and time-consuming. » (Littman et Soloway, 1988)

12.4.1. Discussion des évaluations réalisées

Dans le cadre d'une conception itérative, nous avons conduit trois évaluations de AMBRE-add en combinant différentes méthodes afin d'évaluer différents aspects du logiciel.

Une première expérience, consistant à observer individuellement 5 enfants a été menée afin d'évaluer l'utilisabilité et de détecter les difficultés d'utilisation. Cette expérience a conduit à modifier la prise en main du logiciel, identifier certains problèmes d'utilisabilité ainsi que d'autres difficultés liées aux mathématiques, et nous a conduit à modifier le logiciel. Cependant, cette première étude n'a pas permis de détecter certaines difficultés. En effet, l'observation d'une seule séance d'utilisation n'a pas permis d'observer l'évolution du comportement. De plus, les utilisateurs, recrutés parmi les connaissances des chercheuses et volontaires pour participer, n'étaient pas représentatifs de tous les utilisateurs. Selon les dires de leurs parents, ils étaient plutôt de bons élèves. Par ailleurs, la présence de l'observateur a pu modifier leur comportement et les inciter à s'impliquer davantage dans l'activité.

Après avoir modifié AMBRE-add en fonction de cette première évaluation, nous avons testé l'impact du cycle AMBRE sur l'apprentissage (utilité). Pour cela nous avons comparé l'utilisation de AMBRE-add à l'utilisation de deux logiciels contrôle conçus pour l'expérience et nous avons mesuré l'effet de ces 3 logiciels sur l'apprentissage. Les 78 élèves de CE1 qui y ont participé ont utilisé l'un des systèmes sur une période de six semaines, à raison d'une demi-heure par semaine. Les élèves ont utilisé le logiciel dans la salle informatique de l'école pendant les heures de cours. Ce cadre ne permet pas de contrôler l'environnement, mais il offre l'avantage de pouvoir tester un nombre important d'élèves dans une situation familière pour eux, pendant plusieurs séances, en limitant la mortalité expérimentale (liée par exemple aux abandons). Pour prendre en compte la situation, nous avons noté le type de questions posées, les interventions des encadrants et les différents événements survenus durant la séance.

La conception et la passation se sont révélées assez coûteuses. Elles ont occasionné un travail important pour développer les maquettes contrôles, et ont nécessité la présence de deux personnes durant chaque séance (1 journée par semaine pendant 6 semaines) mais n'ont pas permis d'aboutir à des résultats concluants. Par ailleurs, nous avons été confrontées à des difficultés méthodologiques liées à la condition contrôle. Le nombre de problèmes résolus n'était pas le même avec les logiciels AMBRE-add et « résolution simple » et, lorsque les élèves utilisaient ce dernier, les encadrants ont dû leur apporter des explications complémentaires. Pour concevoir les maquettes contrôle, nous avons enlevé une ou plusieurs étapes au logiciel AMBRE-add. Nous avons ensuite complété la maquette « résolution simple » avec une étape supplémentaire afin de limiter le nombre de problèmes résolus dans cette condition. Nous avons choisi de proposer une activité proche de la reformulation (analyser des données dans un énoncé). Celle-ci consistait à lire un énoncé contenant des valeurs numériques et à identifier les informations pertinentes pour répondre à une question posée. Malheureusement, cette étape n'a pas suffi pour équilibrer le nombre de problèmes résolus avec AMBRE-add et la maquette résolution simple. Il est donc difficile d'interpréter les résultats obtenus. Par ailleurs, le diagnostic proposé pour les deux logiciels contrôle est inspiré du diagnostic de AMBRE-add. Il est donc moins adapté à ces logiciels. Néanmoins, construire un diagnostic spécialement adapté à ces logiciels aurait également pu perturber la comparaison.

Cette seconde expérience nous a conduit à penser que AMBRE-add serait plus adapté aux élèves de CE2. Pour le vérifier, nous avons conduit une autre expérience consistant à

observer une classe utiliser AMBRE-add pendant plusieurs séances. Cette expérience nous a permis de déterminer l'utilisation effective de AMBRE-add par des élèves de CE2 et d'identifier les difficultés persistantes, ceci dans un temps relativement court. Toutefois, la méthode utilisée, principalement basée sur l'observation, a certaines limites : elle ne permet pas de quantifier les comportements observés et peut être biaisée par les *a priori* de l'observateur. La validité de ces résultats pourrait être améliorée en utilisant par exemple une grille permettant de quantifier des comportements prédéterminés ou en faisant des enregistrements vidéo et en analysant les traces d'interaction.

12.4.2. Proposition d'une démarche d'évaluation au cours de la conception

L'expérience que nous avons acquise en conduisant ces différentes évaluations nous amène à penser que nous avons évalué l'impact du logiciel sur l'apprentissage trop prématurément. Pour dépasser cette difficulté, nous pensons que l'analyse des usages doit être intégrée à la conception itérative, préalablement à l'évaluation de l'impact du logiciel sur l'apprentissage.

Dans cette perspective, nous proposons une démarche de conception itérative qui alterne les différents types d'évaluation afin de prendre en compte à la fois l'utilisabilité, l'utilité du système et son usage en situation au cours de la conception⁴.

Après avoir précisé les spécifications d'un premier prototype et l'avoir implémenté, une première étape consiste à évaluer l'utilisabilité du système. Nous avons présenté différentes méthodes d'évaluation précédemment (cf chapitre 10 section 1.2). La mise en évidence des défauts d'utilisabilité peut conduire à de nouvelles spécifications et à une modification du prototype.

L'étape suivante consiste à observer et à analyser les usages en situation réelle d'utilisation. En effet, avant d'évaluer l'impact du logiciel sur l'apprentissage, il nous semble nécessaire d'observer la manière dont les apprenants se l'approprient (observation de la genèse instrumentale du logiciel) et l'utilisent effectivement. L'analyse des usages peut apporter des informations sur le temps nécessaire pour que l'EIAH soit pris en main, l'utilisation effective, et doit permettre d'identifier des difficultés éventuelles. Cette analyse des usages pourra conduire à des modifications du système et à la constitution d'un scénario pédagogique pour faciliter la prise en main du logiciel. Elle pourra être répétée au cours du cycle de conception, afin de « raffiner » la conception du produit à travers des observations d'usages régulières (Hautecouverture et al., 2004).

Lorsque l'observation et l'analyse des usages sont satisfaisantes pour les concepteurs, on pourra alors évaluer l'impact du logiciel sur l'apprentissage à l'aide d'une méthode comparative. Cette méthode nécessite d'avoir un nombre de sujets plus important et de décider d'une condition contrôle. Nous avons vu que le choix de la condition contrôle est délicat ; il doit d'abord être orienté par l'objectif de l'évaluation. Veut-on évaluer l'impact de ce logiciel sur l'apprentissage ou seulement d'une fonctionnalité du logiciel ? Veut-on montrer que ce logiciel est meilleur qu'une autre

⁴ Cette démarche d'évaluation devrait être plus particulièrement adaptée aux EIAH destinés à être utilisés individuellement dans une situation de formation en présence.

méthode existante ?

Si l'objectif est de montrer que le système a un impact sur l'apprentissage, on peut comparer l'EIAH à une situation sans intervention (cf. Ainsworth, Wood et O'Malley, 1998). Si l'objectif est de montrer que le système est meilleur qu'une autre méthode, on doit le comparer à cette méthode. Ainsi, certaines études ont comparé le système à l'enseignant (cf. Shute et Glaser, 1990 ; Koedinger et al., 1997). Enfin, pour connaître l'impact de certaines fonctions du logiciel sur l'apprentissage, on peut comparer l'EIAH à une autre version de l'EIAH (cf. Aleven, Koedinger et Cross, 1999 ; Arroyo et al., 2000) ou à un EIAH contrôle pour lequel on a supprimé certaines fonctions (Mark et Greer, 1995 ; Luckin et Du boulay, 1999). Si un scénario pédagogique a été proposé, l'évaluation pourra être faite suivant ce scénario ; les connaissances acquises par l'apprenant en interaction avec l'EIAH étant dépendantes de la situation d'apprentissage, le scénario permettra de connaître les différents paramètres de la situation dans laquelle l'apprentissage s'est déroulé.

La prise en compte des usages au cours de la conception itérative des EIAH, va dans le sens d'études en ergonomie cognitive (voir par exemple Béguin et Rabardel, 2000, Decortis et al., 2001). Cette position se développe également dans le domaine des EIAH (Hauteau et al., 2004 ; Cottier et Choquet, 2005). Cependant, cette proposition pose différents problèmes. D'abord, ces différentes évaluations successives sont coûteuses en temps (temps de conception, d'observation des usages, d'analyse), ce qui paraît difficilement compatible avec les délais souvent restreints imposés par des contraintes d'ordre économiques. De plus, l'observation et l'analyse des usages posent de nombreux problèmes d'ordre méthodologique. Si certaines méthodes consistent à analyser les interactions entre apprenants (pour des systèmes tels que des plateformes collaboratives), elles ne sont pas utilisables pour analyser l'usage d'EIAH utilisés individuellement. Les méthodes de recueil et d'analyse des usages sont donc encore à développer. Nous pensons que la confrontation des observations et des traces d'interaction pourrait être une voie d'analyse.

12.5. Perspectives

Nous présentons ici les différentes perspectives qui émergent de nos travaux dans le cadre du projet AMBRE. Nous présenterons d'abord certaines applications pratiques visant à faire évoluer le logiciel AMBRE-add. Nous présenterons ensuite les perspectives liées à l'évaluation du logiciel. Puis nous présenterons des perspectives plus générales.

(1) L'évaluation de AMBRE-add auprès d'élèves en classe de CE1 a montré que le logiciel était trop complexe pour eux. Toutefois, les enseignants ont apprécié les activités proposées par AMBRE-add. Aussi, l'équipe de conception du projet a décidé de développer des activités plus simples inspirées de celles proposées par AMBRE-add. Ces activités visent par exemple à comparer des problèmes entre eux, à identifier certains éléments dans l'énoncé (par exemple l'inconnue) ou encore à faire des liens entre l'énoncé et la résolution d'un problème. Ces activités pourront faire travailler différentes compétences autour des problèmes additifs. Elles pourront être utilisées comme activités préparatoires à l'utilisation de AMBRE-add ou comme remédiation pour retravailler

certaines compétences non encore acquises.

(2) Par ailleurs, pour dépasser certaines difficultés rencontrées durant l'utilisation du logiciel, il est prévu de modifier le logiciel. Un tutoriel destiné à présenter les schémas et le logiciel de façon interactive est en cours de conception. Il est prévu d'intégrer un synthétiseur vocal au logiciel afin de limiter les difficultés dues à la lecture et de réduire ainsi la charge cognitive. De plus, afin de dépasser les limites liées à l'implication des élèves, il est envisageable de développer un module capable d'identifier un désengagement ou une stratégie d'essai-erreur.

(3) Comme les évaluations réalisées jusque là n'ont pas permis de démontrer l'impact du cycle AMBRE sur l'apprentissage, nous souhaitons évaluer à nouveau l'impact de AMBRE-add sur l'apprentissage auprès d'élèves en classe de CE2. Nous voulons également profiter de cette expérience pour quantifier l'utilisation d'une stratégie essai-erreur et pour évaluer l'impact des différents messages d'erreurs sur le comportement de sujets à travers l'analyse des traces d'interaction.

Par ailleurs, nous aimerions mettre en place le scénario pédagogique proposé ici en collaboration avec des enseignants, puis observer l'usage du logiciel en classe sans intervention d'intervenants extérieurs. Cette observation pourra nous permettre d'évaluer l'accessibilité du logiciel (son intégration aux pratiques scolaires). Ces évaluations pourront également nous renseigner sur la compréhension des schémas, la genèse instrumentale ou encore sur le rôle de l'enseignant quant à l'implication des élèves dans l'apprentissage.

(4) Comme nous l'avons vu, certaines difficultés rencontrées semblent être associées à des éléments spécifiques au domaine des problèmes additifs (reformulation sous forme de schémas, messages d'erreurs) et à l'âge des apprenants. Le principe proposé par le projet AMBRE étant indépendant du domaine, il nous semble donc important d'appliquer ce principe à d'autres domaines et d'évaluer son impact dans ces domaines. Nous pensons plus particulièrement appliquer ce principe au domaine des statistiques ou au domaine de la conjugaison et évaluer l'impact du cycle AMBRE sur l'apprentissage dans ces domaines.

(5) Enfin, il nous semble essentiel d'intégrer l'analyse des usages au cycle de conception des EIAH. Or les méthodes d'analyse des usages des EIAH sont à notre connaissance encore peu développées. Pour analyser les usages d'un EIAH utilisé individuellement, l'on dispose de différents indicateurs : l'observation du comportement, les traces d'interaction, et éventuellement des auto-confrontations de l'apprenant avec un enregistrement de son activité avec le logiciel. Une voie de recherche intéressante à développer pourrait consister à étudier comment mettre en relation ces différentes sources d'informations afin de mettre en évidence les caractéristiques des usages du logiciel.

Discussion générale

Dans cette dernière partie, nous allons discuter des contributions et des limites des recherches conduites dans le cadre de cette thèse. Nous présenterons ensuite différentes perspectives qui peuvent intéresser les deux domaines de recherche dans lesquels s'inscrit cette thèse, les perspectives spécifiques à chaque domaine ayant été présentées respectivement à la fin de la première et de la deuxième partie

12.6. Résumé de nos travaux

12.6.1. Rappel des objectifs

L'objectif de cette thèse était de mieux comprendre les conditions qui facilitent l'apprentissage à partir d'exemples et de concevoir des environnements informatiques qui facilitent un tel apprentissage dans le cadre du projet AMBRE.

De nombreux travaux sur la résolution de problèmes par analogie montrent que différents facteurs influencent l'apprentissage à partir d'exemples. Aussi, nous avons cherché à expliquer le rôle de ces différents facteurs sur l'apprentissage à partir d'exemples. Nous avons plus particulièrement fait l'hypothèse que certains facteurs ont un effet sur l'apprentissage en ce qu'ils favorisent la mise en œuvre de processus de

généralisation. Aussi, nous avons cherché à préciser ces facteurs et à les manipuler afin de déclencher différents processus de généralisation.

Notre second objectif était de concevoir un EIAH intégrant les conditions favorisant un apprentissage à partir d'exemples et d'évaluer son impact sur l'apprentissage dans le cadre du projet AMBRE. Ce projet vise à concevoir des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) qui guident la résolution de problèmes par analogie à travers le cycle du Raisonnement à Partir de Cas (RàPC) afin de favoriser l'acquisition d'une méthode. Ce projet défend l'idée selon laquelle le RàPC peut être utilisé dans un EIAH comme stratégie d'apprentissage pour favoriser un apprentissage de méthode.

Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons planifié de conduire des expériences visant à déterminer les facteurs déclenchant des différents processus, puis d'appliquer ces résultats à la conception du projet AMBRE. L'évaluation du logiciel devait ensuite fournir d'autres données empiriques permettant de confirmer ou non les théories proposées par les études sur l'apprentissage à partir d'exemples.

12.6.2. Résumé des contributions en psychologie cognitive

Une première revue des études portant sur l'apprentissage à partir d'exemples et sur le raisonnement par analogie nous a conduit à identifier certains facteurs qui semblent jouer un rôle sur la mise en œuvre de processus d'apprentissage. Nous avons ensuite réalisé une première étude afin de mettre en évidence l'effet d'un facteur, la saillance des traits de structure, sur la généralisation. Les résultats de cette étude ont montré que réduire la saillance d'un élément important pour la résolution dans l'énoncé d'un problème conduisait l'apprenant à construire une connaissance plus générale. Cette étude confirme donc l'hypothèse selon laquelle une modification du mode de présentation des problèmes conduit les apprenants à davantage mettre en œuvre des processus de généralisation de connaissances.

Dans une seconde étude, nous avons cherché à déclencher la mise en œuvre de processus de généralisation en manipulant deux facteurs identifiés dans la littérature : la tâche à réaliser et la similarité entre problèmes. Dans cette expérience, les performances obtenues après une phase d'apprentissage étaient assez faibles ; il semble que les participants n'aient pas construit de connaissance suffisamment générale pour résoudre les problèmes proposés. Aussi, cette étude n'a pas permis de mettre en évidence un effet des facteurs manipulés sur la mise en œuvre de processus de généralisation. En revanche, cette étude a soulevé d'autres questions quant aux facteurs en jeu dans le déclenchement de ces processus.

Ainsi, ces études montrent qu'une modification de la manière de présenter les exemples peut effectivement favoriser la mise en œuvre des processus de généralisation. Cependant, il semble difficile de déclencher la mise en œuvre de ces processus ; nos connaissances sur ces différents facteurs et leurs interactions sont sans doute encore trop parcellaires. D'autres études doivent être menées pour préciser les effets des différents facteurs identifiés dans la littérature sur la mise en œuvre des processus de généralisation.

12.6.3. Résumé des contributions dans le domaine des EIAH

Afin d'assurer l'adéquation des EIAH conçus suivant le principe de AMBRE à leur objectif, l'apprentissage, nous avons d'abord repris le cycle AMBRE en précisant, pour chaque étape, les activités que l'apprenant devait effectuer et les processus qu'il devait mettre en œuvre. Ensuite, nous nous sommes appuyés sur les données issues de la revue de littérature sur l'apprentissage à partir d'exemples afin de proposer des recommandations pour faciliter la réalisation de ces activités et la mise en œuvre de ces processus.

Nous avons également participé activement à la conception de l'EIAH AMBRE-add destiné au domaine des problèmes additifs. Au cours de la conception, les recommandations proposées ont dû être adaptées en fonction du domaine d'application, des utilisateurs envisagés, ou des contraintes techniques.

Finalement, nous avons évalué l'utilisabilité de AMBRE-add ainsi que son impact sur l'apprentissage. Ces évaluations n'ont pas permis de montrer l'impact de AMBRE-add sur l'apprentissage. Néanmoins, elles nous ont conduite à analyser la manière dont les élèves utilisent le logiciel et à identifier les difficultés persistantes qui restent à traiter. Nous avons ainsi pu produire des recommandations pour faire évoluer le logiciel dans le cadre d'une conception itérative, et nous avons identifié des utilisateurs pour lesquels AMBRE-add semble adapté.

Par ailleurs, ces différentes évaluations nous ont menée à une réflexion sur les méthodes d'évaluation des EIAH. Elles nous ont conduite à prendre davantage en considération les usages du logiciel. Il nous semble important d'intégrer l'analyse des usages à la conception itérative du logiciel (cf. Beguin et Rabardel, 2000 ; Hauteceuvre et al., 2004). En effet, si l'évaluation de l'impact du logiciel sur l'apprentissage permet de vérifier que le logiciel atteint ses objectifs et d'identifier les contextes dans lesquels il les atteint, l'analyse des usages peut conduire à mieux comprendre comment les apprenants s'approprient le logiciel et peut conduire à identifier ce qu'il faut modifier pour que le logiciel atteigne son objectif.

12.7. Limites de cette étude pluridisciplinaire

Comme nous venons de le présenter, cette étude a apporté une première contribution à la question des conditions qui facilitent l'apprentissage à partir d'exemples et a contribué au développer le projet Ambre dans le cadre d'une conception itérative. Toutefois, il est à noter que nos contributions dans chaque domaine sont assez limitées ; il était en effet difficile d'apporter des contributions plus significatives à chaque domaine étant donné les contraintes temporelles imposées dans le cadre d'une thèse.

Par ailleurs, nous avons rencontré différentes difficultés pour mettre en relation les études en psychologie cognitive et les travaux réalisés dans le cadre de la conception et de l'évaluation des EIAH. Néanmoins la confrontation de ces deux champs recherche a

fait émergé différentes questions à notre sens pertinentes pour les deux domaines. Nous présentons ici ces difficultés et les questions qu'elles soulèvent.

Afin d'atteindre les objectifs de cette thèse, il était prévu de conduire des expériences visant à déterminer les facteurs déclenchants des différents processus, puis d'appliquer ensuite ces résultats à la conception du projet AMBRE. L'évaluation du logiciel devait fournir d'autres données empiriques permettant d'appuyer ou non les résultats obtenus sur l'apprentissage à partir d'exemples.

Dans les faits, seule la revue de littérature a orienté les recommandations proposées pour la conception de AMBRE. Les résultats des différentes expériences menées en psychologie cognitive et les limites mises en évidence à l'issue de ces études n'ont pas été prises en compte lors de la conception. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce décalage entre les objectifs et les résultats. D'abord, pour des raisons d'ordre chronologique, la conception et les expériences en psychologie cognitive ont été conduites en parallèle. Les résultats empiriques issus des expériences réalisées ont été obtenus alors que la conception était déjà assez avancée.

De plus, les résultats des expériences n'étaient pas directement applicables pour le projet AMBRE. En effet, la problématique soulevée et étudiée dans la partie expérimentale était assez large et si notre première étude permet de confirmer l'intérêt d'étudier le lien entre conditions qui facilitent l'apprentissage à partir d'exemples et processus, les résultats obtenus ont une portée trop limitée pour permettre de faire des recommandations. La seconde étude visait à identifier plus précisément des facteurs qui provoque une généralisation, mais n'a pas donné les résultats attendus.

Ces difficultés peuvent être dues au fait que nous avons essayé à la fois de décrire les conditions qui facilitent l'apprentissage, en nous référant aux études déjà publiées, d'expliquer en quoi certaines conditions favorisent l'apprentissage, et de faire des prescriptions. Or ces différents aspects, très présents dans les recherches liées aux situations d'apprentissage sont assez distincts. Comme le souligne Dessus (2002), « *les chercheurs en éducation débattent régulièrement à propos de description et prescription appliquées à leur domaine de travail. Décrire, c'est rendre compte, par une méthode d'observation, de la situation ou de l'activité mise en œuvre par des sujets, en identifiant leurs caractéristiques et leurs conditions d'apparition ou de changement. Prescrire, c'est préconiser la situation optimale, ou encore l'activité que les sujets devraient – ou auraient dû – mettre en œuvre compte tenu de la situation.* ». Si nos recherches proposent une explication plausible de certains effets, il nous semble qu'à ce stade de la recherche, les connaissances et les résultats empiriques concernant le lien entre les conditions de présentation et la mise en œuvre des processus de généralisation sont encore trop limitées pour proposer des prescriptions. En effet, si nous avons identifié différentes variables (liées au mode de présentation des exemples, à l'activité réalisée et à la similarité entre problème) qui semblent avoir un effet sur le déclenchement de processus d'apprentissage, nous connaissons encore mal l'importance et la robustesse de ces effets, ou leurs limites de validité. De plus, la manière dont ces facteurs interagissent reste à étudier.

Par ailleurs, nous souhaitons que l'évaluation de l'impact de l'EIAH sur

l'apprentissage puisse permettre d'apporter de nouvelles données permettant de préciser les conditions qui favorisent la mise en œuvre des différents processus d'apprentissage. Mais ceci n'a pas été possible. En effet, si l'EIAH AMBRE-add est fondé sur des théories et des données empiriques sur la résolution de problèmes par analogie, il intègre aussi d'autres aspects plus liés au domaine d'application et propose certaines interactions, certaines formes de diagnostic et d'explication, qui ne sont pas guidées par la théorie. En conséquence, dans cette étude les résultats de l'évaluation de l'impact de l'EIAH sur l'apprentissage ne sont pas directement exploitables pour valider ou infirmer des théories et données empiriques en psychologie cognitive. Pour que l'évaluation d'un environnement informatique puisse d'avantage conduire à valider une théorie de l'apprentissage, il semble qu'il faille qu'il soit davantage fondé sur cette théorie. Ainsi, dans les systèmes (geometry tutor, lisp tutor) conçus à partir de la théorie ACT*, la conception du diagnostic et du modèle de l'apprenant des tuteurs est entièrement guidée par la théorie ACT* (Anderson et al., 1990). Il est par ailleurs possible de limiter les contraintes liées au domaine de connaissance si l'apprentissage visé est indépendant du domaine, par exemple s'il concerne le développement de compétences transversales ou métacognitives telles qu'apprendre à débattre ou à produire des auto-explications. Ainsi, le système proposé par Conati et Vanlhen (2000) a pour objectif d'encourager les apprenants à élaborer des auto-explications. Les choix de conception fondés sur les études empiriques sur les auto-explications ont été faits indépendamment du domaine et l'évaluation du système porte sur des compétences transversales. Les résultats de l'évaluation sont donc peu orientés par le domaine ; ils peuvent plus facilement contribuer à une meilleure compréhension des conditions qui facilitent l'élaboration d'auto-explications.

Enfin, comme le soulignent certains travaux en psychologie ergonomique (Long, 2000 ; Carroll, 1991, cité par Rabardel, 1995), il est difficile d'appliquer à la conception d'un logiciel des théories ou des résultats qui ont été produits sans prendre en compte ni l'activité des apprenants médiée par un artéfact ni le domaine d'application. En effet, lors de la conception de situations d'apprentissage, il semble nécessaire de prendre en considération les processus mis en œuvre par l'apprenant, mais aussi les connaissances en jeu et la question des activités réalisées par l'apprenant lorsqu'il utilise un système. Dans le cadre du projet AMBRE, nous avons essayé de prendre en considération les processus à travers les recommandations produites, les connaissances en nous appuyant sur des études en didactique des disciplines et les activités en observant l'utilisation du logiciel en classe au cours des différentes évaluations. Toutefois nous avons rencontré des difficultés à faire des recommandations cohérentes qui prennent en compte ces trois aspects, parfois contradictoires. Aussi, il semble probablement nécessaire de les prendre en compte plus précocement.

Si cette étude présente différentes limites, elle met également en évidence différentes questions de recherches spécifiques à chaque domaine, que nous avons décrit dans les discussions de chaque partie, ainsi que des questions intéressantes pour les deux domaines.

12.8. Perspectives

Les perspectives que nous présentons ici mettent en évidence différentes questions de recherche qui ont un intérêt à la fois théorique, pour mieux comprendre les conditions qui favorisent la mise en œuvre de processus de généralisation, mais aussi pratique, pour le projet AMBRE et pour favoriser la conception d'EIAH.

12.8.1. Mieux comprendre la généralisation par adaptation

Comme nous l'avons vu dans la discussion de la première partie, on manque encore de connaissances sur la manière dont des connaissances générales sont construites au cours de l'adaptation. La deuxième étude que nous avons réalisée nous a en particulier conduit à nous interroger sur le rôle de la présence de la source au cours de l'adaptation. Est-ce qu'avoir le problème source « sous les yeux » lors de l'adaptation a un effet sur la généralisation ? La généralisation est-elle plus importante si le sujet doit se remémorer le problème source pour l'adapter ? L'effet de la présence du problème source dépend-elle de la similarité entre problèmes ? On peut par exemple supposer que si les problèmes ont des traits de surface proches, la présence de la source permettra de résoudre le problème sans généraliser alors que si les problèmes ont des traits plus éloignés, l'adaptation nécessitera la généralisation de certaines connaissances.

Cette question est particulièrement pertinente pour la conception d'environnements d'apprentissage tels que AMBRE dans lesquels l'adaptation joue un rôle important. En effet, si la généralisation est supérieure lorsque le sujet se remémore lui-même un problème source, alors le choix des caractéristiques des problèmes sources et cibles ou encore la présentation des problèmes sources et cibles côte à côte dans l'étape d'adaptation pourrait être remise en cause.

LA MISE EN ŒUVRE DES PROCESSUS EST-ELLE VOLONTAIRE ?

À la fin de la première partie, nous avons soulevé une seconde question : la mise en œuvre des processus de généralisation doit-elle nécessairement s'effectuer de manière délibérée ? Peu d'études portent sur cette question, mais celles-ci vont plutôt dans le sens d'une mise en œuvre délibérée des processus comme condition nécessaire à l'apprentissage. Cette hypothèse a des implications pour la conception des EIAH. En effet, nous avons vu que certains élèves essaient de répondre par essai-erreur en tirant partie des fonctionnalités du système pour produire une réponse correcte sans réfléchir au problème posé. Lorsque les apprenants appliquent cette stratégie, ils n'essaient pas de mettre en œuvre un processus de généralisation à partir des exemples ou du problème présenté, au contraire. Donc si les processus doivent être mis en œuvre de manière volontaire pour que s'opère un apprentissage, les EIAH destinés à faciliter la mise en œuvre de ces processus doivent proposer une interaction qui incite l'apprenant à être actif et doivent limiter (et tenter de supprimer) les possibilités de répondre ou de

passer à l'étape suivante automatiquement sans une réflexion approfondie sur le problème.

PRENDRE EN COMPTE LA VARIABILITÉ INTER-INDIVIDUELLE

Enfin, une dernière question concerne la variabilité individuelle. Les différentes expériences et évaluations conduites ne prennent que peu en compte les variations interindividuelles. Elles sont gommées lors de l'analyse des performances du groupe. Pourtant, certains travaux ont pu mettre en évidence l'existence de différences individuelles dans le recours aux différents processus d'apprentissage (Renkl, 1997 ; Didierjean et Cauzinille-Marmèche, 1997). Quelles sont les origines de ces différences ? Ces différences individuelles sont-elles le fruit de contraintes cognitives : par exemple un processus pourrait-il nécessiter plus de ressources cognitives que d'autres ? Sont-elles le reflet de véritables « styles » cognitifs ? Ont-elles un caractère stable ?

Une meilleure connaissance de ces variabilités inter-individuelles pourrait être bénéfique pour la conception des EIAH. En effet, un atout des EIAH supports aux situations d'apprentissage est leur capacité à s'adapter aux caractéristiques individuelles des apprenants. Ainsi, certains systèmes intègrent un modèle de l'apprenant qui permet de modéliser ses connaissances, puis de les actualiser au cours de l'apprentissage afin d'adapter les contenus proposés en conséquence. S'il existe des caractéristiques stables quant à la mise en œuvre des processus chez un même individu, cette information pourrait constituer une dimension supplémentaire permettant de proposer des activités ou des formats de présentations plus adaptés à l'apprenant.

PRENDRE D'AVANTAGE EN COMPTE L'ARTICULATION ENTRE PROCESSUS, ACTIVITÉS ET CONNAISSANCES

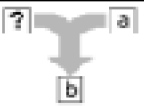
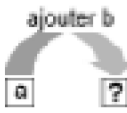
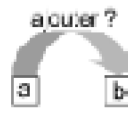
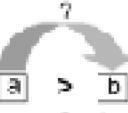
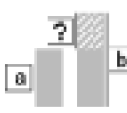
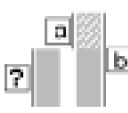
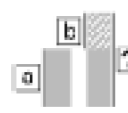
Enfin, comme nous l'avons souligné précédemment, si la prise en compte des processus d'apprentissage est nécessaire pour la conception des EIAH, il est également important de prendre en considération les activités médiées par l'EIAH dans lesquels l'apprenant est engagé ainsi que les connaissances en jeu dans la situation d'apprentissage. Or ces trois aspects soulèvent différentes questions de recherches traitées par des domaines de recherches différents (psychologie cognitive, didactique des disciplines, ergonomie) qui trop souvent s'ignorent. Comme le soulignent Van Merriënboer et Kirschner (2001), ces différents aspects constituent « *three worlds of instructional design* » ayant des méthodes, des théories de références, et des terrains d'études distincts. Selon ces auteurs, les recherches portant sur la conception de situations d'apprentissage gagneraient à ce que des « ponts » soient bâtis entre ces trois « mondes ».

Long (2000) propose, dans le cadre de la conception d'artéfacts, de prendre en compte à la fois les mécanismes cognitifs, le domaine d'application et l'activité médiée par l'artéfact en construisant des modèles intermédiaires s'appuyant sur des modèles des mécanismes cognitifs proposés par la psychologie cognitive. Ainsi, le modèle intermédiaire peut faire l'objet de différentes évaluations, qui peuvent conduire à faire évoluer celui-ci. Si ce modèle intermédiaire dans sa nouvelle forme est en contradiction avec ses fondements théoriques, ceux-ci pourraient être remis en question. L'évolution du

modèle intermédiaire pourrait alors poser de nouvelles questions sur le fonctionnement cognitif. Il semble intéressant d'étudier la pertinence d'une telle proposition dans le domaine des EIAH. Plus généralement, il semble nécessaire de trouver de nouvelles voies pour prendre en considération les problématiques communes aux études des mécanismes cognitifs, des connaissances et compétences à acquérir et des activités médiées par un artéfact.

Annexes

Annexe 1 : Classification des problèmes additifs représentée par des schémas

Catégorie réunion	 $a + b = ?$	 $? + a = b$	
Catégorie changement Opérateur "ajouter"	 $a + b = ?$	 $? + a = b$	 $a + ? = b$
Catégorie changement Opérateur "enlever"	 $a - b = ?$	 $? - a = b$	 $a - ? = b$
Catégorie changement Opérateur inconnu	 $a + ? = b$	 $a - ? = b$	
Catégorie comparaison	 $a + ? = b$	 $? + a = b$	 $a + b = ?$

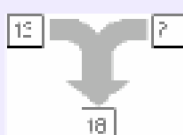
Annexe 2 : Copies d'écran du logiciel Ambre-add

Présentation d'un problème prototypique

Autre façon présentation de problèmes : billes

Énoncé du problème
Antoine et Famsin ont ensemble 18 billes. Antoine a 13 billes. Combien Romain a-t-il de billes ?

Réécriture du problème



Rédaction de la solution

Le problème s'écrit : $13 + ? = 18$

La solution est : 5

La réponse est : Romain a 5 billes

On résout le problème à partir de sa réécriture.

Bilan des problèmes-type

Autre - billes des modèles : Emma

Voici tous les modèles que tu as déjà vus, observe les :
(sois que tu vas de voir apparaître différemment)

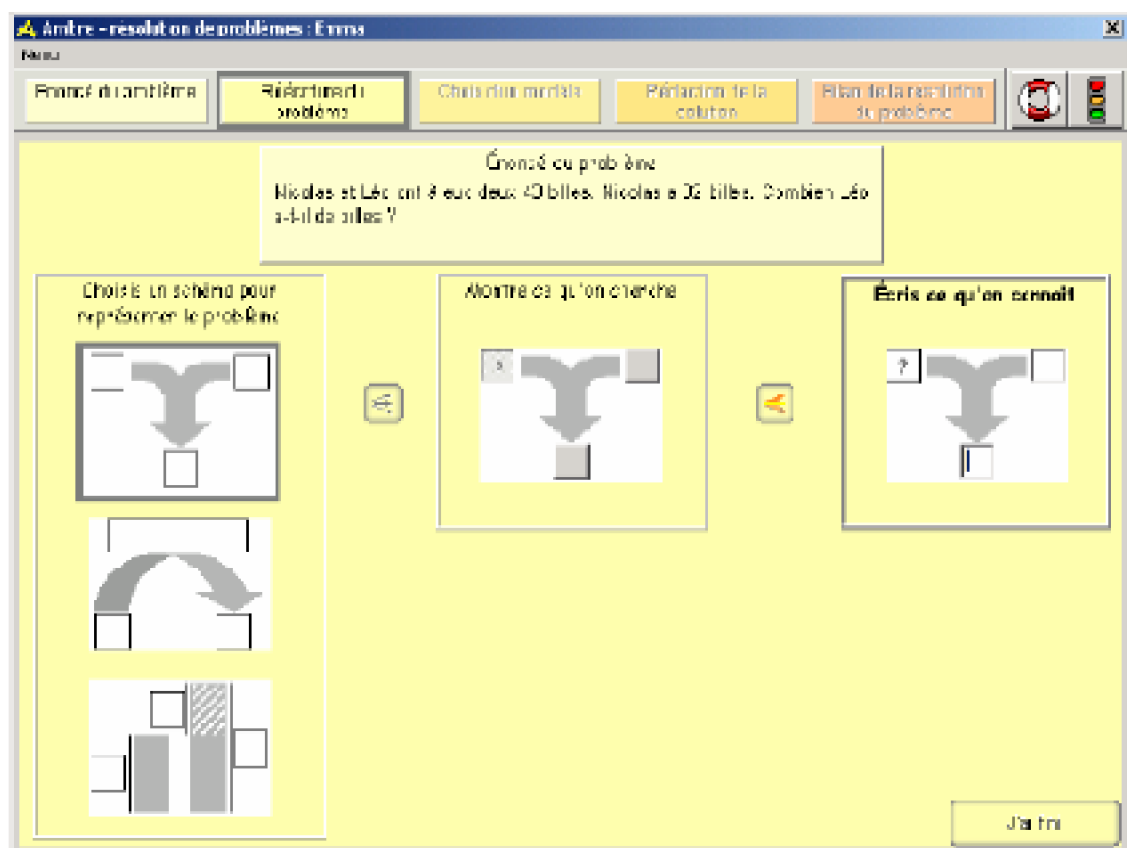
Simon joue aux billes. Il perd 7 billes. Après le jeu, il lui reste 13 billes. Combien de billes avait-il avant le jeu ?	Romain et Céleste jouent aux billes. Romain avait 19 billes ; il en a perdu 5. Combien en a-t-il à la fin de la partie ?	Romain avait des billes. Il a gagné 5 billes en jouant avec Fabrice. Romain a maintenant 8 billes. Combien en avait-il avant de jouer ?	Antoine et Romain ont ensemble 18 billes. Antoine a 13 billes. Combien Romain a-t-il de billes ?
Le problème s'écrit : $? - 7 = 13$ L'opération s'écrit : $7 + 13 = ?$ La solution est : 20 La réponse est : Simon avait 20 billes.	Le problème s'écrit : $19 - 5 = ?$ L'opération s'écrit : $19 - 5 = ?$ La solution est : 14 La réponse est : Romain a 14 billes.	Le problème s'écrit : $? + 5 = 8$ L'opération s'écrit : $8 - 5 = ?$ La solution est : 3 La réponse est : Romain avait 3 billes.	Le problème s'écrit : $? + 13 = 18$ L'opération s'écrit : $18 - 13 = ?$ La solution est : 5 La réponse est : Romain a 5 billes.

J'ai fini

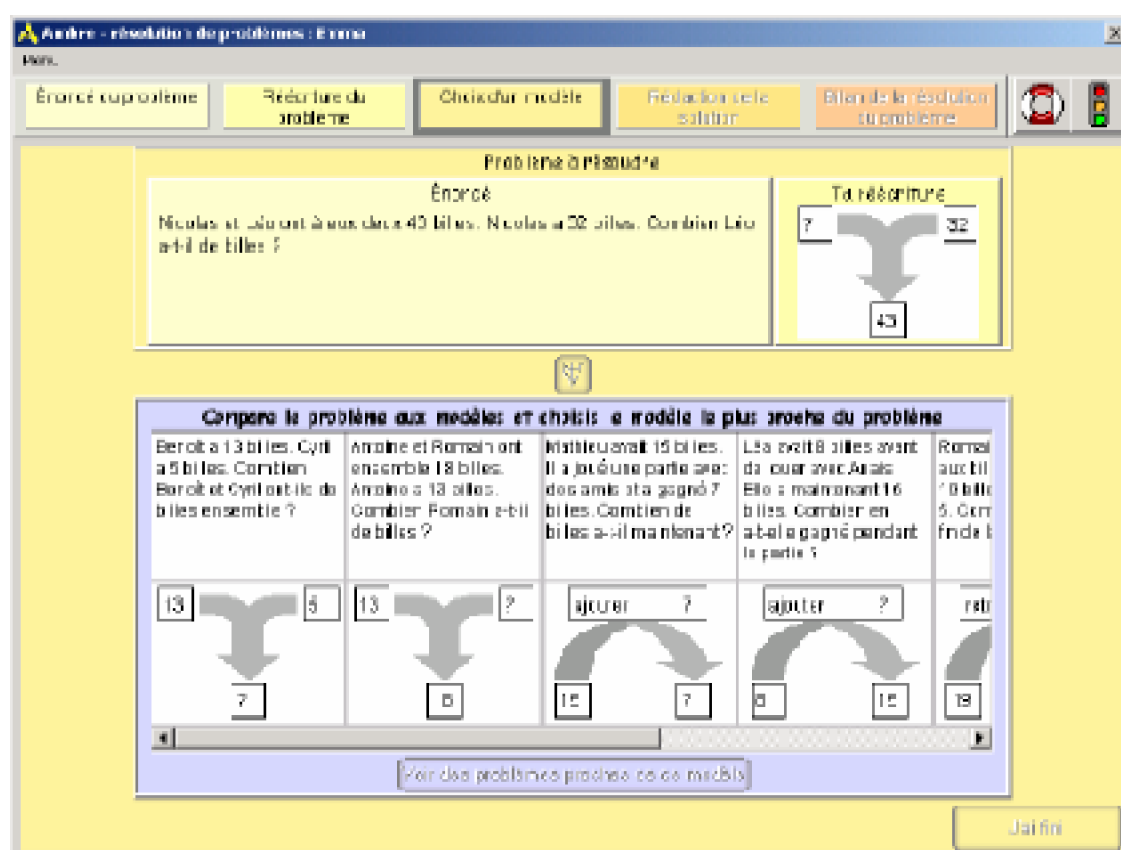
Présentation de l'énoncé du problème



Etape de reformulation



Etape de choix d'un problème-type



Etape d'adaptation

Amkre - résolution de problèmes: Enma

Plan:

- Énoncé du problème
- Réécriture du problème
- Choix d'un modèle
- Rédaction de la solution
- Plan de classement du problème

Le modèle que tu as choisi

Énoncé
Antoine et Fomain ont ensemble 6 billes. Antoine a 13 billes. Combien Remain a-t-il de billes ?

Réécriture
13 + ? = 19

Rédaction de la solution
Le problème s'écrit : $13 + ? = 19$

La solution est : 5

La réponse est : Remain a 5 billes.

Le problème à résoudre

Énoncé
Nicolas et Léo ont à eux deux 43 billes. Nicolas a 32 billes. Combien Léo a-t-il de billes ?

Réécriture
? + 32 = 43

Rédaction de la solution
Le problème s'écrit : $? + 32 = 43$

La solution est : 11

Comment s'écrit le problème ?
Léo a 32 billes. Nicolas a 43 billes. Combien Léo a-t-il de billes ?

La réponse est : Léo a 11 billes.

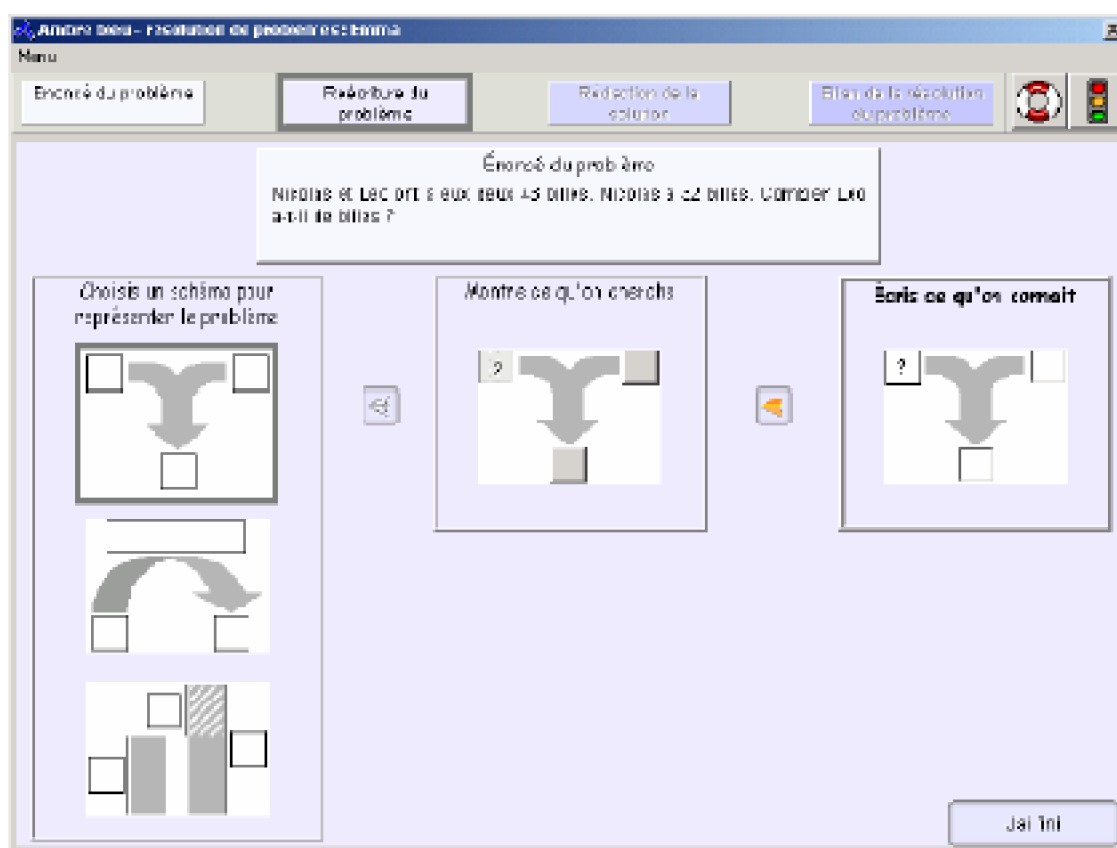
J'ai fini

Etape de classement





Etape de reformulation du problème



Etape de rédaction de la solution

Ambrebleu - résolution de problèmes : Ennio

Mais...

Énoncé du problème Réécriture du problème Rédaction de la solution Bilan de la résolution du problème

Problème à résoudre

Énoncé

Nicolas et Léo ont à eux deux 43 billes. Nicolas a 32 billes. Combien Léo en a-t-il de billes ?

Tu résoutes

?

32

43

Rédaction de la solution

Le problème s'écrit : $7 + 32 = 43$

La solution est : 11

Quelle est la réponse à la question ?

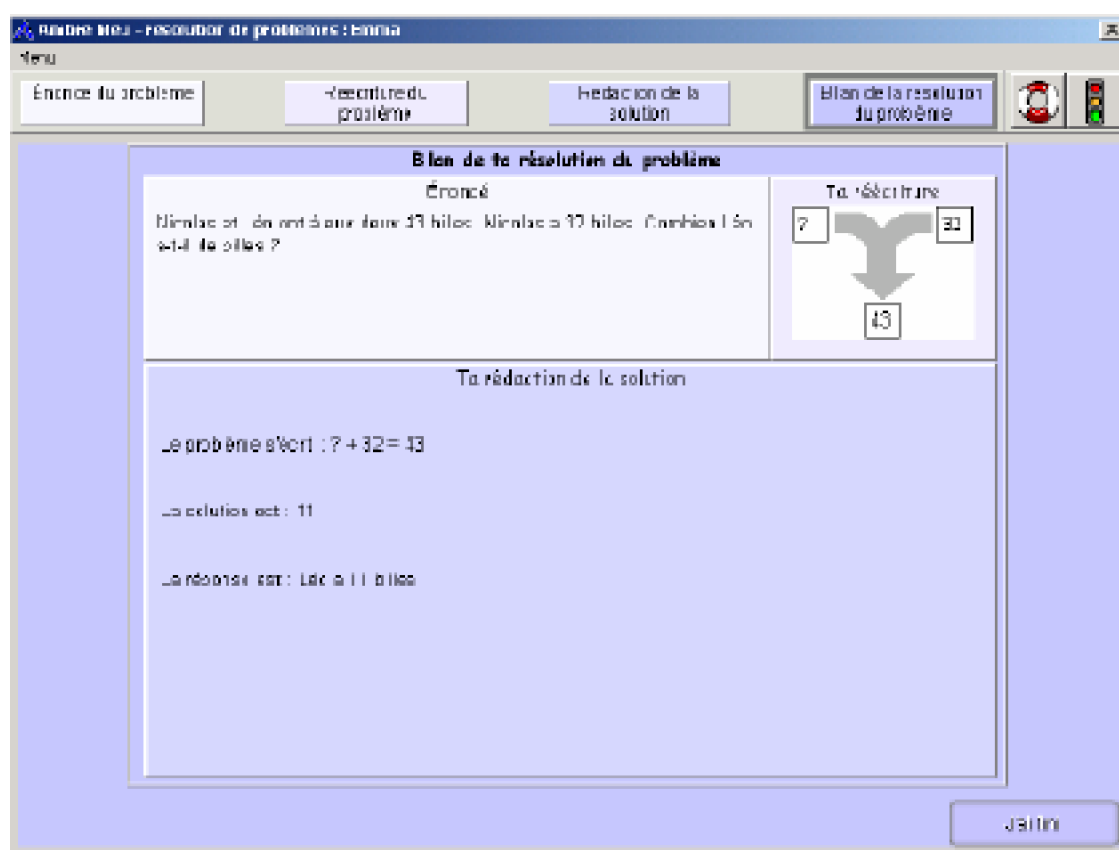
L'an s 11

La réponse est : Léo a 11 ...

Titre(s)
Luncheon(s)
chocolat(s)
saute-elle(s)

J'ai fini

Bilan de la résolution



Annexe 4 : Copies d'écran du logiciel contrôle « résolution simple »

Présentation des problèmes-types

André rouge - présentation d'exemples : finna

Énoncé de l'exemple

Antoine et Romain ont ensemble 18 billes. Antoine a 13 billes. Combien Romain en a-t-il de billes ?

Rédaction de la solution

Le problème s'écrit : $13 + x = 18$

La solution est : x

La réponse est : Romain a 5 billes



Rédaction de la solution

Arbre rouge - résolution de problèmes - Emma

Menu

Énoncé du problème Rédaction de la solution Bilan de la résolution du problème

Problème à résoudre

Énoncé

Nicolas et Léo ont à eux deux 43 billes. Nicolas a 32 billes. Combien Léo a-t-il de billes ?

Rédaction de la solution

Le problème s'écrit : $32 + ? = 43$

La solution est : 11

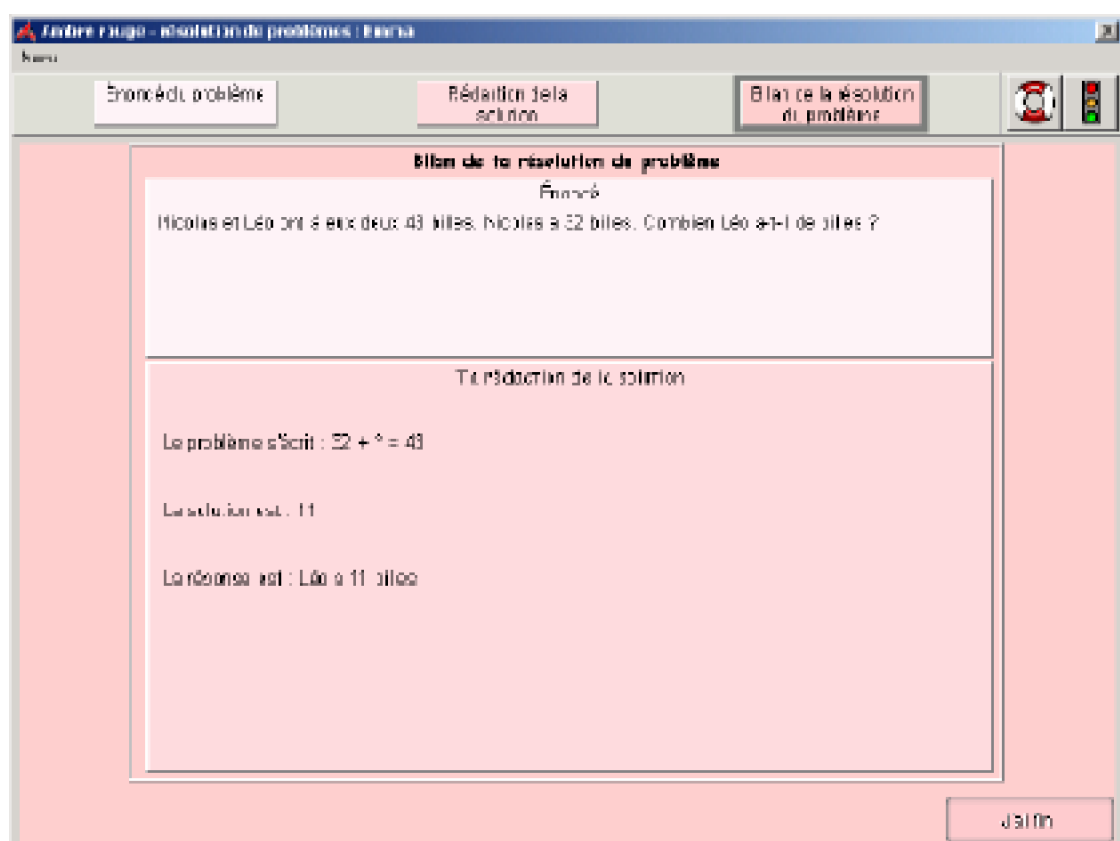
Quelle est la réponse à la question ?

Léo a 11 billes

La réponse est : Léo a 11 ...

J'ai fini

Bilan de la résolution du problème



Tâche complémentaire : rechercher des informations dans un énoncé de problèmes

Annexe 5 - tâche supplémentaire terminale

Lis attentivement ce texte

Aline a invité ses amis à son goûter d'anniversaire. 9 filles et 7 garçons sont venus. Son amie Emilie lui a offert 78 perles. Aline range les perles que lui a données Emilie dans une boîte. Avant, il y avait 51 perles dans la boîte. Maintenant, en tout, Aline a 129 perles.



Réponds à la question ci-dessous

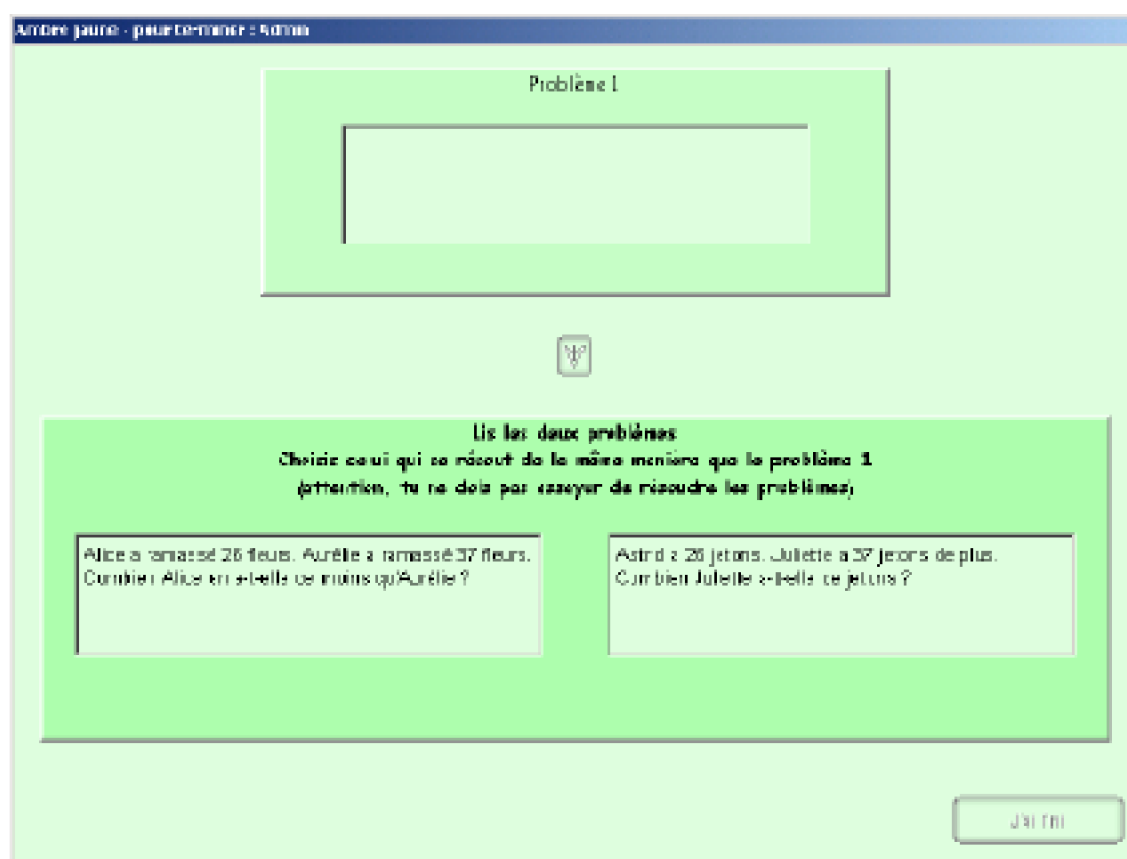
Combien Emilie est-elle allée offrir de perles à Aline ?

Annexe 5 : Test de « détection de similarités de structures »

Présentation de l'énoncé



Enoncés de problèmes à choisir



Annexe 6 : Exemples de problèmes présentés par le logiciel

Problème de type réunion

Benoît a 13 billes. Cyril a 5 billes. Combien Benoît et Cyril ont-ils de billes ensemble ?

Nicolas et Léo ont à eux deux 43 billes. Nicolas a 32 billes. Combien Léo a-t-il de billes ?

Problème de type changement

Florent avait 36 billes. Il a gagné 11 billes en jouant avec Fabrice. Combien a-t-il de billes à la fin de la partie ?

Laurent a perdu 11 billes en jouant avec ses camarades. Il a 37 billes à la fin de la partie. Combien en avait-il au début de la partie ?

Luc a gagné quinze billes en jouant aux billes avec Nicolas. Il a maintenant cinquante-six billes. Combien en avait-il avant de jouer avec Nicolas ?

Emilie avait 41 perles. Sophie lui en a donné. Émilie a maintenant 55 perles. Combien Sophie lui en a-t-elle données ?

Mathieu avait 19 billes, il n'a plus que 14 billes à la fin de la récréation. Combien en a-t-il perdu au cours de la récréation ?

Laurent avait trente-cinq images de foot. Il a acheté de nouvelles images à l'épicerie. Maintenant il a cinquante-neuf images. Combien en a-t-il acheté ?

Problème de type comparaison

Carole a quarante-cinq sauterelles dans une boîte et Eli trente et une. Combien Eli en a-t-il de moins que Carole ?

Aline a quarante-trois bonbons, elle en a douze de moins que Juliette. Combien Juliette a-t-elle de bonbons ?

Arthur a trente-six perles. Julie a cinq perles de moins qu'Arthur. Combien Julie a-t-elle de perles ?

Annexe 7 : Exemples de problèmes présentés pendant les tests en classe

Exemples de problèmes faciles

Nina a 35 perles. Avec Lucie, elles ont ensemble 47 perles. Combien Lucie a-t-elle de perles ?

Lucas avait 43 petites voitures. Il en a perdu plusieurs. Il en a maintenant 31. Combien a-t-il perdu de petites voitures ?

Problèmes difficiles proches

Sophie, Sébastien et Coline ont ramassé des pommes. Sophie a ramassé 18 pommes, Sébastien en a ramassé 34. Coline et Sébastien ont à tous les deux ramassé 45 pommes. Combien Coline a-t-elle ramassé de pommes ?

Cyril avait 36 autocollants et 60 images. A la récréation, il a échangé des images avec ses copains. Maintenant il a 46 images. A-t-il gagné ou perdu des images pendant l'échange et combien ?

Problèmes difficiles éloignés

Justine, Alexis et Laura ont reçu de l'argent pour Noël. Justine a reçu 27 euros. Alexis a reçu 30 euros. Alexis et Laura ont reçu à tous les deux 44 euros. Combien Laura a-t-elle reçu d'argent ?

Aurélien a 10 ans. Il avait 44 euros dans sa poche. Après avoir été jouer avec son copain Sylvain, il a 33 euros. Aurélien a-t-il reçu ou donné de l'argent et combien ?

Annexe 8 : Liste des observables utilisés pour préparer l'observation des utilisateurs de Ambre-add en laboratoire

- prise en main du logiciel:
 - délais très longs apparemment non justifiés
 - observation des demandes d'aide de premier niveau.
 - temps pendant lequel l'apprenant cherche ce qu'il doit faire,
 - questions éventuelles que l'apprenant se pose au début de l'utilisation
 - gestes, mimiques traduisant des difficultés d'utilisation
 - hésitations
 - retours en arrière
 - temps sur la phase 0, temps passé sur la consigne
 - verbalisations spontanées : vocabulaire sur lequel il bute, répétition de la consignequestionnaire
- Efficacité d'utilisation
 - Difficultés systématiques,
 - Indices identiques aux précédents répétés dans le temps
 - Signes d'agacement, d'incompréhension répétée ou de découragement
 - hésitations
 - retours en arrière
 - verbalisations traduisant un effort disproportionné
 - manipulations inutiles, ne conduisant pas à l'effet voulu

- Facilité de mémorisation
 - Lors de la 2^e séance :
 - Difficulté à réutiliser certains éléments d'interface
 - Temps de reprise en main de l'outil
 - Nombre de problèmes résolus
 - Nombre de problème sur lesquels des difficultés de prise en main existent
 - Questions de compréhension sur le fonctionnement du système
 - Gestes, mimiques, verbalisations montrant que l'apprenant « se sent perdu »
- les erreurs
 - Etude des verbalisations en cas d'erreur,
 - Etude des mimiques d'agacement de l'utilisateur,
 - nombre d'erreurs
 - Indicateurs d'un sentiment de surprise lorsqu'une erreur est indiquée
 - Temps de lecture des messages d'explications
 - comportement d'essai erreur.
- Compréhension générale
 - Questionnaire
 - Test : explication de chaque schéma, donner un exemple
 - Observation de la navigation entre étapes
 - Temps passé sur les schémas
 - erreurs faites par rapport aux choix des schémas
 - utilisation de l'aide
- Charge cognitive
 - Expressions d'un sentiment d'être perdu, dépassé
 - Questionnaire
 - Echelle subjective
- Satisfaction
 - Questionnaire comprenant une échelle de satisfaction

Annexe 9 : Questionnaire sur l'utilisation de Ambre-add

Prénom..... Nom

1. As-tu déjà utilisé un ordinateur ? ☐ oui ☐ non

2. est-ce que tu utilises souvent un ordinateur ?
plusieurs fois par semaine / 1 fois par semaine / 1 fois par mois / moins

3. Qu'est ce que tu fais avec l'ordinateur ?
☐ des jeux ☐ des jeux éducatifs ☐ des dessins ☐ des maths
☐ autres matières ☐ autre

4. Est ce que tu aimes les mathématiques ?
pas du tout beaucoup



Appréciation générale

5. Utiliser AMBRE était
très difficile très facile



très ennuyeux très agréable



6. As-tu eu du mal à savoir comment te servir du logiciel ?
☐ pas du tout ☐ un peu ☐ beaucoup ☐ tout le temps

7. As-tu eu l'impression d'être perdu(e) ?
☐ jamais ☐ au début ☐ parfois ☐ souvent

8. Qu'est ce qui t'a paru difficile ? (quelles difficultés as-tu rencontré ?)

Problèmes de compréhension

9. As-tu eu des difficultés à comprendre les consignes ? ☐ oui ☐ non

10. As-tu eu des difficultés à comprendre les mots employés dans le logiciel ? ☐ Oui ☐ Non

11. As-tu compris ce qu'il fallait faire dans chaque étape ?

Pas du tout

très bien



Quelle étape était la plus difficile ? pourquoi ?

.....

.....

Aide

12. As-tu fait appel à la boucle ?

☐ jamais ☐ au début ☐ parfois ☐ souvent

13. As-tu fait appel au lien à l'extérieur ?

☐ jamais ☐ au début ☐ parfois ☐ souvent

14. Si oui, est-ce que les messages t'ont aidés ? Sinon, pourquoi ?

.....

.....

Erreurs

Lorsque tu as fait des erreurs,

15. est-ce que tu as compris l'explication donnée par le système ?

☐ difficilement ☐ pas toujours ☐ plutôt bien ☐ très bien

16. Est-ce que les explications t'ont aidé ?

tu peux faire d'autres remarques ici :

.....

.....

Annexe 10 : Fiche de séance

Séance.....

Classe.....

Matériel utilisé.....

Enseignants présents.....

Nombre d'élèves présents.....

Atmosphère générale

☐ très mauvaise ☐ assez mauvaise ☐ bonne ☐ très bonne

relation entre élèves et enseignants :

Fréquence des interactions

- dépannage
- aide à l'utilisation du logiciel
- aide aux mathématiques
- rassurer les élèves
- autres

nature des interactions (dépannage / aide à l'utilisation du logiciel / aide aux mathématiques / rassurer les élèves / autres (préciser))

.....

.....

Interactions entre élèves :

Nature des interactions (relatives au logiciel / mathématiques / autres)

.....

Fréquence des interactions relatives (cotation)

- logiciel
- mathématiques
- autres

remarques / incidents / éventuels

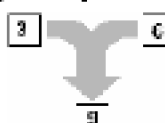
.....

Annexe 11 : Grille d'observation individuelle

Nom de l'élève	Nom de l'observateur		
Séance.....			
Rédécriture : «Comment le schéma est-il choisi ? (observez la vitesse du choix, les regards vers l'énoncé...)			
.....			
Choix du modèle			
.....			
Manière dont les problèmes sont adaptés (observation des regards : utilisation du modèle : allers retour du modèle au problème ?) utilisation de la rédaction : regards vers la rédaction lors de la construction de l'énoncé ?)			
.....			
Difficultés (utilisation du logiciel / mathématiques / conflit entre utilisation et logiciel)			
.....			
Réactions par rapport aux erreurs			
.....			
Utilisation de l'aide et du diagnostic			
.....			
Réactions émotionnelles éventuelles			
.....			
Implication		Motivation	
pas du tout	beaucoup	pas du tout	beaucoup
			

Annexe 12 : Test de compréhension des schémas

Donner un exemple de problème qui correspond à chaque schéma :



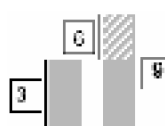
Réponse de G : « Roussin a 3 billes et Charlotte a 6 billes. Combien ils ont ensemble de billes ? »

Réponse de S. : « Colline a 6 billes, Adrien a 6 billes, Jean a voté 4 billes. Combien lui en reste-t-il ? »



Réponse de G : « Laura a 3 billes, elle en rachète 6 combien de billes elle a ? »

Réponse de S. : « Léo et Léon vont à un anniversaire, Les amène 9 gâteaux et Léon amène 6 gâteaux. Combien il auront de gâteaux ? »



Réponse de F. : « Laura a 6 perles de moins que Stéphan qui a 9 perles. Combien Laura a-t-elle de billes ? Elle a 3 billes. »

Réponse de J. : « Julien a 9 bonbons, Laura a 6 bonbons, Gwendoline a 3 bonbons. Combien ont-ils ensemble ? »

Annexe 13 : Exemples de problèmes présentés par Ambre-add dans expérience en CE2

Nicolas et Léo ont à eux deux 98 billes. Nicolas a 39 billes. Combien Léo a-t-il de billes ?

Clara a vingt-six perles et Aurélie soixante-quatre. Combien Clara en a-t-elle de moins qu'Aurélie ?

Camilla a commencé une collection de timbres. Son papa lui en offre trente-quatre de plus. Maintenant elle en a soixante-treize. Combien en avait-elle au début ?

Emilie avait 41 perles. Sophie lui en a donné. Emilie a maintenant 79 perles. Combien a-t-elle reçu de perles ?

Thomas avait 83 bonbons. Il en a donné 19 à Malika. Combien en a-t-il maintenant ?

Thomas est venu à l'école avec des autocollants. Il en a donné 23 à Luc dans la journée. Le soir il lui en reste 66. Combien en avait-il en arrivant à l'école ?

Ce matin, Martin a acheté une boîte de quatre-vingt biscuits. Maintenant il reste trente-deux biscuits dans la boîte. Dans la journée, sa fille Emilie en a mangé plusieurs. Combien Emilie a-t-elle mangé de biscuits ?

Vincent commence sa collection. Il a déjà trente-sept fèves. Céline a une collection de soixante-dix-neuf fèves. Combien en a-t-elle de fèves de plus que Vincent ?

Léa a trente-cinq perles. Jessica en a vingt-huit de plus. Combien Jessica a-t-elle de perles ?

Sophie avait soixante-sept billes avant de jouer avec Aurélie. Après elle n'en a plus que trente-huit. Que s'est-il passé pour Sophie pendant la partie ?

Julien avait quatre-vingt-quinze autocollants au début de la récréation. Après avoir fait des échanges, il lui en reste dix-huit. A-t-il gagné ou perdu des autocollants, et combien ?

Annexe 14 : Questions sur l'utilisation de Ambre-add proposé aux élèves de CE2

Prénom _____ Nom _____

1. As-tu déjà utilisé un ordinateur ? ☐ oui ☐ non

2. As-tu un ordinateur chez toi ? ☐ oui ☐ non

3. Est-ce que tu utilises souvent un ordinateur ?
☐ plusieurs fois par semaine ☐ 1 fois par semaine ☐ 1 fois par mois ☐ moins

4. Qu'est-ce que tu fais avec l'ordinateur ?
☐ des jeux ☐ des jeux éducatifs ☐ des dessins
☐ des maths ☐ d'autres matières (français...) ☐ autre

5. Est-ce que tu aimes les mathématiques ?
pas du tout beaucoup


AMBRE

6. Utiliser AMBRE émeur
très difficile très facile

très ennuyeux très agréable


7. Qu'est-ce que tu as trouvé agréable ?
.....

8. Qu'est-ce que tu as trouvé désagréable ?
.....

9. As-tu eu du mal à savoir comment te servir du logiciel ?
☐ pas du tout ☐ un peu ☐ beaucoup ☐ tout le temps

10. As-tu eu l'impression d'être perdu(e) ?

11. ☐ jamais ☐ au début ☐ parfois ☐ souvent

12. Y a-t-il quelque chose dans le logiciel qui t'a aidé pour résoudre les problèmes ?

.....

.....

Compréhension

13. As-tu eu des difficultés à comprendre les consignes ? ☐ oui ☐ non

14. As-tu eu des difficultés à comprendre les mots employés dans le logiciel ? ☐ oui ☐ non

15. As-tu compris ce qu'il fallait faire dans chaque étape ?

Pas du tout

Très bien



16. Quelle étape était la plus difficile ? Pourquoi ?

.....

17. As-tu eu d'autres difficultés ?

.....

18. Qu'est-ce qui t'a le plus aidé dans le logiciel ?

.....

.....

19. Comment les schémas t'ont-ils aidé ?

.....

20. Quelles difficultés les schémas t'ont-ils posées ?

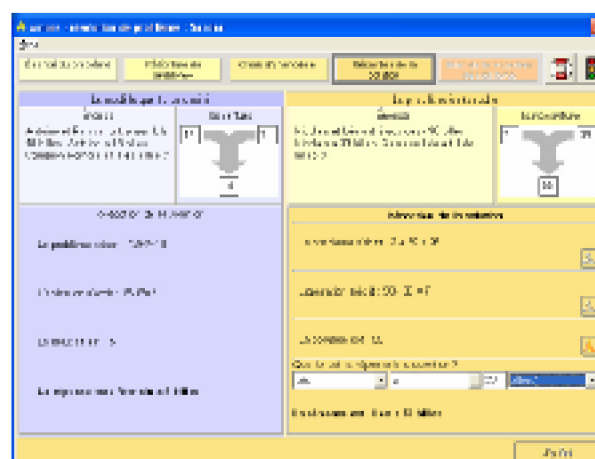
.....

.....

21. As-tu utilisé le modèle pour rédiger la solution du problème ? Comment ?

23. As-tu utilisé le réseau d'une des problèmes pour résoudre la solution? Comment?

24. Fais-tu sur la copie d'écran la réécriture des problèmes à résoudre en bleu et le modèle en rouge.



Annexes

24. As-tu fait appel à la bouée ?
- ☐ jamais ☐ au début ☐ parfois ☐ souvent
25. As-tu fait appel au feu tricolore ?
- ☐ jamais ☐ au début ☐ parfois ☐ souvent
26. Si oui, est-ce que les messages t'ont aidé ?
- ☐ jamais ☐ au début ☐ parfois ☐ souvent

Erreurs

Lorsque tu as fait des erreurs,

27. Est-ce que tu as compris l'explication donnée par le système ?

☐ difficilement ☐ pas toujours ☐ plutôt bien ☐ très bien

28. Apprends-tu quelque chose quand tu te trompes ?

☐ pas du tout ☐ un peu ☐ beaucoup ☐ tout le temps

29. Est-ce que les explications t'ont aidé ?

☐ jamais ☐ au début ☐ parfois ☐ souvent

Bibliographie

- Aadmodt, A. & Plaza, E. (1994). Cased Based Reasoning : Foundational issues, methodological variations , and system approaches. *AICOM*, 7,,39-59.
- Ahn, W., Brewer, W. F., & Mooney, R. J. (1992). Schema acquisition from a single example. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 18, 391-412.
- Ainsworth, S. & Loizou, A. T. (2003). The effects of selfexplaining when learning with text or diagrams. *Cognitive Science*, 27, 669-681.
- Ainsworth, S. E., Wood, D., & O'Malley, C. (1998). There is more than one way to solve a problem: Evaluating a learning environment that supports the development of children's multiplication skills. *Learning and Instruction*, 8(2), 141-157.
- Aka, M. & Frasson, C. (2002). A New Approach on Flight Training: ASIMIL. In *Proceedings of international symposium TICE 2002*, Lyon, France, 307–314.
- Aleven, V. (2003). Using background knowledge in case-based legal reasoning: a computational model and an intelligent learning environment. *Artificial Intelligence*, 150, 183-237.
- Aleven et Ashley, (1997). Evaluating a Learning Environment for Case-Based Argumentation Skills. *ICAIL 1997*: 170-179.
- Aleven, V., & Koedinger, K. R. (2002). An Effective Meta-cognitive Strategy: Learning by Doing and Explaining with a Computer-Based Cognitive Tutor. *Cognitive Science*,

26 (2), 147-179.

Aleven, V., K. R. Koedinger, and K. Cross (1999). Tutoring answer explanation fosters learning with understanding. In *Proceedings of AIED-99*, Amsterdam, IOS Press, 199-206.

Anderson, J.R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA, Harvard University Press,

Anderson, J.R., Boyle, C.F., Corbett, A.T., & Lewis, M.W. (1990). Cognitive modeling and intelligent tutoring. *Artificial Intelligence*, 42, 7-49.

Anderson, J.R., Farrell, R. & Sauers, R. (1984). Learning to Program in Lisp. *Cognitive Science*, 8, 87-129.

Anderson, J. R., Kline, P. G., & Beasley, C. M. (1979). A general learning theory and its applications to schema abstraction. In G. H. Bower (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation*, 13, San Diego, CA: Academic Press, 277-318.

Arroyo, I., Beck, J. E., Woolf, B. P., Beal, C. R., & Schultz, K. (2000). Macroadaptating animalwatch to gender and cognitive differences with respect to hint interactivity and symbolism. In G. Gauthier & C. Frasson & K. VanLehn (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference ITS 2000* (1839) Berlin: Springer-Verlag, 574-583.

Atkinson, R.K. & Catrambone, R. (2000). Subgoal learning and the effect of conceptual vs. computational equations on transfer. In: L.R. Gleitman & A.K. Joshi (eds), *Proceedings of the 22th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Mahwah,NJ: Erlbaum, 591–596.

Atkinson, R.K., Derry, S.J., Renkl, A., & Wortham, D.W. (2000). Learning from examples: Instructional principles from the worked examples research. *Review of Educational Research*, 70, 181-214.

Baddeley, A. (1986). *Working memory*, Oxford, Oxford University Press.

Bain W. (1986). Cased-base reasoning: A comuter model of subjective assessment, *PhD Thesis*. Yale University.

Baker, R.S., Corbett, A.T., Koedinger, K.R. (2004). Detecting Student Misuse of Intelligent Tutoring Systems. In *Proceedings of International Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS'2004)*, Maceio, Brasil, Springer, 531-540.

Balacheff, N. (1994a). Didactique et intelligence artificielle. In Balacheff, N. & Vivet, M. (eds.), *Didactique et intelligence artificielle*, La pensée sauvage éditions, Grenoble, 7-42.

Balacheff, N. (1994b). La transposition informatique, un nouveau problème pour la didactique des mathématiques, In Artigue et al. (eds.), *Vingt ans de didactique des mathématiques en France*, La pensée sauvage éditions, Grenoble, 364-370.

Balacheff, N. (2002). Contribution à la réflexion sur la recherche sur les Environnement Informatiques pour l'Apprentissage Humain. In Baron G.-L. et Bruillard E. (eds.), *Les technologies en éducation : Perspectives de recherches et questions vives*,.Paris : INRP-MSH-IUFM de Basse Normandie, 193-201.

Bannert M. (2002). Managing cognitive load – recent trends in cognitive load theory. *Learning and Instruction* 12(1), 139-146.

Baron M., Gras R., & Nicaud, J.F. (1991). Introduction. In Baron M., Nicaud J.F. (eds.),

- In *actes des deuxièmes journées EIAO de Cachan*, Editions de l'ENS de Cachan, 7-8.
- Bassok, M. (1990). Transfert of domain-specific problem-solving procedures. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16, 522-533.
- Bassok, M. & Holyoak, K.J. (1989). Interdomain transfer between isomorphic topics in algebra and physics. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*. 15, 153-166.
- Bassok, M., Wu, L.L., & Olseth, K.L. (1995). Judging a book by its cover: Interpretative effects of content on problem-solving transfer. *Memory and Cognition* (23), 354-367.
- Barfurth, M.A., Basque, J., Chomienne, M. & Winer, L.R. (1994). Les instruments de collecte de données de recherche qualitative dans des environnements pédagogiques informatisés. In Bordeleau, P. (eds.), *Apprendre dans des environnements pédagogiques informatisés*, Editions Logiques, 485-548.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: An experimental and social study*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Bastien, C. & Scapin, D. (1993). Critères ergonomiques pour l'évaluation des interfaces utilisateurs, RT n°156, INRIA.
- Beck, J.E. (2004). Using response times to model student disengagement. In *Workshop on Social and Emotional Intelligence in Learning Environments, Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS'2004)*, Maceio, Brasil, 13-20.
- Béguin P. & Rabardel P. (2000). Concevoir des activités instrumentées. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 14, 35-54.
- Bélanger, S., Thibodeau, M.-A. & Aïmeur, E: (1999). Training of the Learner in Criminal Law by Case-Based Reasoning. In *Twelve International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems (IEA/AIE-99)*, Cairo, Egypt, 398-408.
- Bernardo, A.B. (2001). Principle explanation and strategic schema abstraction in problem solving. *Memory & cognition*, 29 (4), 627-633
- Bielaczyc, K., Pirolli, P. & Brown, A.L. (1995). Training in self explanation and self-regulation strategies: investigating the effect of knowledge acquisition activities on problem solving. *Journal of Educational Psychology*, 86, 122-133.
- Blessing, S. B. & Ross, B. H. (1996). Content Effects in Problem Categorization and Problem Solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22 , 792-810.
- Brousseau (1998). *Théorie des situations didactiques*, Grenoble, La Pensée Sauvage.
- Brown, A.L., & Kane, M.J. (1988). Preschool children can learn to transfer: Learning to learn and learning from example. *Cognitive Psychology*, 20, 493-523.
- Bruillard, E. (1997). *Les machines à enseigner* Paris, Hermès.
- Burke, R. & Kass, A. (1996). Retrieving stories for Cased-Based Teaching. In leake, D. (ed.), *Cased Based Reasoning : Experiences, Lessons, and future directions*, Menlo Park : AAAI Press/MIT Press, 93-110.
- Capus, L. & Tourigny, L. (2000). Le raisonnement à partir de cas : une aide à la

- formation en analyse de sécurité routière. In *Proceedings of international symposium TICE 2000, Troyes, France*, 227–235.
- Carbonell, J. G. (1983). Learning by analogy: Formulating and generalizing plans from past experience. In R. Michalsky, J. G. Carbonell, & T. M. Mitchell (Eds.), *Machine learning: An artificial intelligence approach*, Palo Alto, CA: Tioga Press.
- Carrol, W. (1994). Using worked examples as an instructional support in the algebra classroom. *Journal of Educational Psychology*, 86, 360-367.
- Catrambone, R. (1994). Improving examples to improve transfer to novel problem. *Memory & Cognition*, 22, 606-615.
- Catrambone, R. (1995). Aiding subgoal learning: Effect on transfers. *Journal of Educational Psychology*, 87, 5-17.
- Catrambone, R. (1996). Generalizing solution procedures learned from examples. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22, 1020-1031.
- Catrambone, R. (1998). The subgoal learning model and problem-solving transfer: Creating better examples so that students can solve novel problems. *Journal of Experimental Psychology: General*, 127, 355–376.
- Catrambone, R., & Holyoak, K. J. (1989). Overcoming contextual limitation on problem-solving transfer. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15, 1147-1156.
- Cauzinille-Marmèche, E. & Didierjean, A. (1999). Raisonnement par analogie et généralisation des connaissances, In G. Netchine-Grynberg (Ed.), *Développement et fonctionnement cognitif : vers une intégration*, Paris, Presses Universitaires de France, 125-152.
- Caverni, J.P. (1988). La verbalisation comme source d'observables pour l'étude du fonctionnement cognitif. In Caverni, J.P., Bastien, C., Mendelsohn, P. & Tiberghien, G. (eds.), *Psychologie cognitive, modèles et méthodes*, Presse Universitaire de Grenoble, 253- 273.
- Champin, P.A., Prié, Y., & Mille A. (2004). MUSERTE: a Framework for Knowledge Capture from Experience In *EGC'04*, Clermont Ferrand, France.
- Chandler, P., & Sweller, J. (1991). Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and Instruction*, 8, 293-332.
- Chandler, P., & Sweller, J. (1992). The split-attention effect as a factor in the design of instruction. *British Journal of Educational Psychology*, 62, 233-246.
- Chandler, P. & Sweller, J. (1996). Cognitive load while learning to use a computer program. *Applied Cognitive Psychology*, 10, 151-170.
- Chase, W.G. & Simon, H.A. (1973). Perception in Chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55-81.
- Chen, Z. & Mo, L. (2004). Schema induction in problem solving: A multidimensional analysis, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 30 , 583-600
- Chi, M.T.H., Bassok, M., Lewis, R., Reimann, P. & Glaser, R. (1989). Self-explanations: How students study and use examples in learning to solve problems, *Cognitive*

- Science*, 13, 145-182.
- Chi, M.T.H., De Leeuw, N., Chiu, M.H. & La Vancher, C. (1994). Eliciting Self-Explanations Improves Understanding. *Cognitive Science*, 18, 439-477.
- Chi, M.T., Feltovich, P.J. & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- Chi, M. T. H., Glaser, R. & Rees, E. (1982). Expertise in problem solving. In Sternberg, R. S. (ed.), *Advances in the Psychology of Human Intelligence*, 1, Hillsdale, NJ Erlbaum, 1-75.
- Conati C. & VanLehn K. (1999). Teaching meta-cognitive skills: implementation and evaluation of a tutoring system to guide self-explanation while learning from examples. In *Proceedings of, 9th World Conference of Artificial Intelligence and Education (AIED '99)*, Le Mans, France.
- Conati C. & VanLehn K. (2000). Toward Computer-Based Support of Meta-Cognitive Skills: a Computational Framework to Coach Self-Explanation. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 11, 389-415.
- Cooke, N.J., Atlas, R.S., Lane, D.M. & Berger, R. C. (1993). Role of High-Level Knowledge in Memory for Chess Positions. *American Journal of Psychology*, 106, 321-351.
- Cooper, G. & Sweller, J. (1987). The effects of schema acquisition and rule automation on mathematical problem-solving transfer. *Journal of Educational Psychology*, 79, 347-362.
- Cottier P., Choquet C. (2005). De l'utilisateur construit à l'utilisateur participant. In *actes de EIAH'2005*, Montpellier, France, 449-454.
- Cummins, D. (1992). Role of analogical reasoning in the induction of problem categories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 5, 1103-1124.
- Damm R. (1992). Apprentissage des problèmes additifs et compréhension de texte. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Decortis, F., Daele, L., Polazzi, L., Rizzo, A. & Saudelli, B. (2001). Nouveaux instruments actifs et activités narratives. *Revue d'interactions homme-machine*, 2(2), 1-30.
- De Croock, M.B.M., van Merriënboer, J.J.G., & Paas, F.G.W.C. (1998). High vs. low contextual interference in simulation-based training of troubleshooting skills: Effects on transfer performance and invested mental effort. *Computers in Human Behaviour*, 14, 249-267.
- De Graef, P., Christaens, D., & D'Ydewalle, G. (1990). Perceptual effects of scene context on object identification. *Psychological Research*, 52, 317-329.
- De Jong, G.F., & Mooney, R. (1986). Explanation-based learning: An alternative view. *Machine Learning*, 1, 145-176.
- Delozanne, E. (1992). Explications en EIAO : études à partir d'ELISE, un logiciel pour entraîner à une méthode de calcul de primitives. *Thèse de doctorat*, Université du Maine, Le Mans.
- Dessus, P. (2002). Description et prescription dans les méthodes de recherche en

- éducation. In Marcel J.-F. (Eds), *Les sciences de l'éducation, des recherches, une discipline*, Paris, L'harmattan.
- Didierjean, A (2001). Apprendre à partir d'exemples: Abstraction de règles et/ou mémoire d'exemplaires ? *L'Année Psychologique*, 101, 325-348.
- Didierjean, A. (2003). Is case-based reasoning a source of knowledge generalization ? *European Journal of Cognitive Psychology*, 15, 435-453.
- Didierjean, A. & Cauzinille-Marmèche, E. (1998). Reasoning by analogy : Is it schema mediated or case-based? *European Journal of Educational Psychology*, 13 , 385-398.
- Didierjean, A., Cauzinille-Marmèche, E. & Savina, Y. (1999). Learning from examples: Case-based reasoning in chess for novices. *Current Psychology of Cognition*, 18 , 337-361.
- Didierjean, A., Ferrari, V., & Marmèche, E. (2004). L'expertise cognitive au jeu d'échec : quoi de neuf depuis De groot (1946) ? *L'Année Psychologique*, 104, 771-793.
- Dubourg, X. & Teutsch, P. (1997). Interface Design Issues in Interactive Learning Environments. In *Proceedings of IFIP WG 3.3 Working Conference, Human-Computer Interaction and Educational Tools*, Sozopol.
- Dubourg, X., Delozanne, E. & Grugeon, B. (1995). Situations d'interaction dans un environnement d'apprentissage : le système Repères. In *actes des Quatrièmes Journées EIAO de Cachan*, Paris, Eyrolles eds, 223-244.
- Duclosson, N., Jean-Daubias, S., Riot, S. (2005). AMBRE-enseignant : un module partenaire de l'enseignant pour créer des problèmes. In *Actes de EIAH'2005*, Montpellier, 353-358.
- Duclosson N. (2004). Représentation des connaissances dans l'EIAH AMBRE-add. In *Proceedings of international symposium TICE 2004*, Compiègne, 164-171.
- Duncker, K. (1945). On problem solving, Part I: The structure and dynamics of problem-solving processes. *Psychological Monographs*, 58, 5, n°270.
- Elio, R., & Anderson, J.R. (1983). Effects of category generalization and instance similarity on schema abstraction. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 113, 541-555.
- Ellman, T. (1989). Explanation-Based Learning: Explanation-Based Learning: A Survey of Programs and Perspectives. *Computing Surveys* 21(2), 163-221.
- Fayol, M. (1990). *L'enfant et le nombre*, Neuchatel, Paris : Delachaux et Niestlé.
- Falkenhainer, B., Forbus, K. D., & Gentner, D. (1989). The structure-mapping engine: Algorithm and examples, *Artificial Intelligence*, 41, 1-63.
- Farenc, N. (1997). ERGOVAL : Une méthode de structuration des règles ergonomiques permettant l'évaluation automatique d'interfaces graphiques. *Thèse de doctorat en informatique*, Université Toulouse I.
- Fasse, B.B., & Kolodner, J.L. (2000). Evaluating Classroom Practices Using Qualitative Research Methods: Defining and Refining the Process. In *Proceedings of International Conference of the Learning Sciences* 93-198.
- Fisher, J.-P. (1979). La perception des problèmes soustractifs aux débuts de l'apprentissage de la soustraction. *Thèse de doctorat en Didactique des*

thématiques, Université Nancy 1.

- Fisher, J.-P. (1993). La résolution des problèmes arithmétiques verbaux : propositions pour un enseignement proactif. *Annales de didactique et de sciences cognitives*, 5, IREM de Strasbourg, 177-210.
- Frasson, C. (1998). Using cognitive agents for building pedagogical strategies in multistrategic intelligent tutoring system. In *actes de la deuxième journée Acteurs, Agents et Apprentissage*, Bayonne.
- Fuchs, B., Lieber, J., Mille, A., et Napoli, A. (1999). Towards a unified theory of adaptation in Case-Based Reasoning. In *Proceedings of the third International conference on Case-based Reasoning (ICCBR-99)*, Lecture notes in Artificial Intelligence, Germany, Springer Verlag.
- Funk P. & Conlan O. (1988). Case-Based Reasoning to Improve Adaptability of Intelligent Tutoring Systems. In *Workshop on Case-Based Reasoning for Education and Training, CBRET'2002*, Aberdeen, Scotland, 15-23.
- Gagné, R.M., Briggs, L.J. & Wager, W.W. (1988). *Principles of instructional design*, New York, Holt, Renhart and Winston Eds.
- Gerjets, P., Scheiter, K., & Catrambone, R. (2004). Designing instructional examples to reduce intrinsic cognitive load: Molar versus modular presentation of solution procedures. *Instructional Science*, 32, 33-58.
- Gentner, D. (1983). Structure Mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, 155-170.
- Gentner, D. (1989). The mechanisms of analogical learning, In Vosniadou S. & Ortony A. (Eds.), *Similarity and analogical reasoning*, New York, Cambridge University Press, 199-241.
- Gick, M.L., & Holyoak, K.J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive Psychology*, 12, 306-355.
- Gick, M.L., & Holyoak, K.J. (1983). Schema induction and analogical transfer, *Cognitive Psychology*, 15, 1-38.
- Gick, M.L., & McGarry, S.J. (1992). Learning from mistakes: Inducing analogous solution failures to a source problem produces later successes in analogical transfer, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18, 623-639.
- Gick, M.L., & Paterson, K. (1992). Do contrasting examples facilitate schema induction and analogical transfer? *Canadian Journal of Psychology*, 46, 539-550.
- Gilbert, J.E. (2000). Case-Based Reasoning Applied to Instruction Method Selection for Intelligent Tutoring Systems. In *Workshop Case-Based Reasoning in Intelligent Training Systems, ITS'2000*, Montreal, 11-15.
- Gilly, M., Roux, J.-P. & Trognon A. (1999). *Apprendre dans l'Interaction : analyse des médiations sémiotiques*. Presses Universitaires de Nancy et Publications de l'Université de Provence.
- Gineste, M. D. (1997). *Analogie et Cognition*, Paris, Presse Universitaire de France.
- Gobet, F. (1998). Chess players' thinking revisited. *Swiss Journal of Psychology*, 57, 18-32.
- Gobet, F., & Simon, H.A. (1996a). Recall of random and distorted chess positions:

- implications for the theory of expertise. *Memory & Cognition*, 24, 493-503.
- Gobet, F., & Simon, H.A. (1996b). Templates in chess memory: a mechanism for recalling several boards. *Cognitive Psychology*, 31, 1-40.
- Greeno, J.G. & Riley, M.S. (1987). Processes and development of understanding. In Weinert F.E. & Kluwe R.H. (Eds.), *Metacognition, motivation and understanding*, Chap 10, 289-313.
- Gregori N., Hautecouverture J.-C., Godart C. & Charoy, F. (2004). Ergonomie, culture, scénario, trois facteurs pour la conception d'une plate-forme de coopération. *RSTI-RIA*, 19 (1-2), 215-234.
- Guin D. (1991). La notion d'opérateur dans une modélisation cognitive de la compréhension des problèmes additifs. *Math. Inf. Sci. Hum.* (113), 5-33.
- Guin-Duclosson, N. (1999). Syrciad : une architecture de solveurs de problèmes permettant d'explicitier des connaissances de classification, reformulation et résolution. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 13(2), 225-282.
- Guin-Duclosson, N., Jean-Daubias, S. & Nogry, S. (2002). The AMBRE ILE: How to Use Case-Based Reasoning to Teach Methods. In *proceedings of International Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS'2002)*, Biarritz, France, Springer, 782-791.
- Hammond, K.J. (1990). Explaining and Repairing Plans That Fail. *Artificial Intelligence*, 45, 173-228.
- Hautecouverture J.-C., Grégori N., Paquelin D., Charoy F., Godart C., Patten M. & Faugeras I. (2004). Analyse d'usage d'une plate-forme de coopération : Usage et développement logiciel. *Cahiers romans de sciences cognitives*, 1(3), 45-77.
- Héraud, J.-M. (2002). Pixed : towards the sharing and the re-use of experience to assist training. In *Proceedings of World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications*, Denver, USA, 777-782.
- Hoecker, D. & Elias, G. (1986). User evaluation of the LISP intelligent tutoring system. In *Proceedings of the human factors society*, 32(3), 313-324.
- Holyoak, K.J. (1984). Analogical thinking and human intelligence. In R. J. Sternberg (ed.), *Advances in the psychology of human intelligence*, (2), Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Holyoak, K.J., & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & Cognition*, 15, 332-340.
- Holyoak, K.J., & Thagard, P. (1989). Analogical mapping by constraint satisfaction, *Cognitive Science*, 13, 295-355.
- Holyoak, K. J. & Thagard, P. (1995). *Mental leaps: Analogy in creative thought*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Howell, D.C. (1998). *Méthodes statistiques en sciences humaines*, Paris, éditions De Boeck universités.
- Hû, O., & Trigano, P. (1998). Propositions de critères d'évaluation de l'interface homme-machine des logiciels multimédias pédagogiques. In *proceedings of IHM'98*, Nantes.

- Hudson, J. (1988). Children's memory for atypical actions in script-based stories: Evidence for a disruption effect, *Journal of Experimental child psychology*, 46, 159-173.
- Hudson, J., Fivush, R., Kuebly, J. (1992). Scripts and episodes: The development of event memory. *Applied Cognitive Psychology*, 6, 483-505.
- Hummel, J. K., & Holyoak, K. J. (1997). Distributed representations of structure: A theory of analogical access and mapping, *Psychological Review*, 104, 427-466.
- Jean, S. (2000). Application de recommandations ergonomiques : spécificités des EIAO dédiés à l'évaluation. In *Actes des Rencontres Jeunes Chercheurs en IHM 2000*, 39-42.
- Jean-Daubias, S. (2004). De l'intégration de chercheurs, d'experts, d'enseignants et d'apprenants à la conception d'EIAH. In *Proceedings of international symposium TICE'2004*, Compiègne, 290-297.
- Joiron, C. & Lecllet, D.(2003). Inciting discussions between physicans about clinical cases: The Diacom forum and its pairing module. In *Proceedings of Conference on Open and Online Learning, ICOOL 2003*, Ile Maurice.
- Jonshon, H.M. & Seifert, C.M. (1992). The Role of Predictive Features in Retrieving Analogical Cases. *Journal of Memory and Language*, 31 , 648-667.
- Kaplan, C.A., & Simon, H.A. (1990). In search of insight. *Cognitive Psychology*, 22, 374-419.
- Keane, M.T., Ledgeway, T., & Duff, S. (1994). Constraints on analogical mapping: a comparison of three models. *Cognitive Science*, 18 , 387-438.
- Koedinger, K. R., Anderson, J. R., Hadley, W. H., & Mark, M. A. (1997). Intelligent tutoring goes to school in the big city. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 8, 30-43.
- Kieras D.E. & Bovair S. (1986). The Acquisition of Procedures from Text: A Production System Analysis of Transfer of Training. *Journal of Memory and Language*, 25 , 507-375.
- Khan, T.M.: Case-Based Evaluation for Student Modelling. *Workshop 5: Case-Based Reasoning in Intelligent Training Systems, ITS'2000*, Montreal, 16-22.
- Kolodner, J. (1993) *Case-Based Reasoning*, San Mateo, Morgan Kaufman Publishers.
- Kolodner, J. (1997). Educational implications of analogy: A view from case-Based Reasoning. *American Psychologist*, 52, 35-44.
- Le Calvez F., Giroire, H., Duma, J., Tisseau, G. & Urtasun, M. (2004). Utilisation d'un logiciel pour apprendre une méthode dans le cadre d'une UE de méthodologie en DEUG. In *proceedings of Technologies de l'Information et de la Communication dans les Enseignements d'Ingénieurs et dans l'Industrie (TICE2004)* Compiègne, 115-120.
- Le Calvez, F.; Urtasun, M.; Tisseau, G.; Giroire, H.; & Duma, J. (1997). Les machines à construire : des interfaces pour apprendre une méthode constructive de dénombrement. In Baron, Mendelsohn, and Nicaud (eds), *actes des 5èmes Journées francophones EIAO*, Hermès, 49-60.
- LeFevre, J.A. & Dixon, P. (1986). Do written instruction need examples? *Cognition and Instruction*, 3, 1-30.

- Lewis, C., Polson, P.G., Wharton, C. & Rieman J. (1990). Testing a walkthrough methodology for theory-based design of walk-up-and-use interfaces. In Chew, J .C., & Schneiderman J. Whiteside (eds.), *CHI'90: Human Factors in Computing Systems*, ACM, New York, 235-242.
- Litmann, D. & Soloway, E. (1988). Evaluating ITSs: The cognitive science perspective. In M. Polson and J. J. Richardson (eds.), *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*. Hillsdale, NJ: LEA.
- Long, J. (2000). Psychologie cognitive et ergonomie cognitive, deux approches des systèmes complexes. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 14, 13-34.
- Luckin R. & Du Boulay B., (1999). Ecolab : the development and evaluation of a vygotskian design framework. *International journal of artificial Intelligence in Education*. 10, 198-220.
- Mark, M., & Greer, J. E. (1995). The VCR tutor: Effective instruction for device operation. *The Journal of the Learning Sciences*, 4(2), 209-246.
- Marmèche, E., & Didierjean, A. (2001). Is generalization conservative ? *European Journal of Cognitive Psychology*, 13, 475-49
- Masterton, S. (1997). The Virtual Participant: Lessons to be Learned from a Case-Based Tutor's Assistant. In proceedings of *International conference on Computer Support for Collaborative Learning*, Toronto, 179-186.
- Marthe P. (1982). Problèmes de type additif et appropriation par l'élève des groupes additifs Z et D entiers relatifs et décimaux relatifs. *Thèse de doctorat*, EHESS, Paris.
- Mayer, R.E. (2001). *Multimedia learning*, Cambridge University Press.
- Mayer, R.E. & Moreno R. (2003). Nine Ways to Reduce Cognitive Load in Multimedia Learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 43-52.
- Mayer, R. E., & Anderson, R. B. (1991). Animations need narrations: An experimental test of a dual-coding hypothesis. *Journal of Educational Psychology*, 83, 484-490.
- Michalsky, R. S. (1983). Theory and methodology of inductive learning. In R. S. Michalsky, J. G. Carbonell, & T. M. Mitchell (Eds.), *Machine learning: An artificial intelligence approach*. Palo Alto, CA: Tioga Press.
- Mille A. (1998). Associer expertise et expérience pour assister les tâches de l'utilisateur, *Habilitation à diriger des recherches*, Université Claude Bernard, Lyon1.
- Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81–97.
- Minsky M. A. (1975). Framework for Representing Knowledge. In P. Winston (ed), *The psychology of computer vision*, New York, McGraw-Hill, 211–277.
- Mitchell, T.M., Keller, R. & Kedar-Kabelli, S. (1986). Explanation-Based Generalization: A Unifying View. *Machine Learning*, 1, 47-80.
- Mooney, R. J. (1990). Learning plan schemata from observation: Explanation-based learning from plan recognition, *Cognitive Science*, 14, 483-509.
- Mostow J. & Tedesco, P. (eds) (2004). Proceedings of *Workshop on Social and Emotional Intelligence in Learning Environments, Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS'2004)*, Maceio, Brasil, 13-20.

- Mostow, J., Aist, G., Beck, J.E., Chalasani, R., Cuneo, A., Jia, P., & Kadaru, K. (2002) A La Recherche du Temps Perdu, or As Time Goes By: Where does the time go in a Reading Tutor that listens? *In proceedings of Sixth International Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS'2002)*, Biarritz, France, Springer-Verlag,
- Needham, D., & Begg, I. (1990). Problem-oriented training promotes spontaneous analogical transfer: Memory oriented training promotes memory for training. *Memory & Cognition*, 19, 543-557.
- Neuman, Y., & Schwarz, B.B. (1998). Is self-explanation while solving problems helpful? The case of analogical problem solving. *British Journal of Educational Psychology*, 68, 15-24.
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*, Academic Press.
- Nielsen, J. & Landauer, T.K. (1993). A mathematical model of the finding of usability problems. In *Proceedings of ACM INTERCHI'93 Conference*, Amsterdam, The Netherlands, 206-213.
- Nogry, S. (2001). Validation d'un EIAH fondé sur le raisonnement à partir de cas pour l'enseignement de méthodes. *Rapport de DEA rapport de recherche du LIRIS RR-2004-032*.
- Nogry, S. & Didierjean, A. (soumis). Apprendre à partir d'exemples : interactions entre présentation du matériel, activités des apprenants et processus cognitifs.
- Nogry, S., Jean-Daubias, S., & Duclosson, N. (2004). ITS evaluation in classroom: the case of the AMBRE ITS. In *Proceedings of International Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS'2004)*, Maceio, Brasil, Springer, 511-520.
- Nogry, S., Jean-Daubias, S. & Guin-Duclosson N. (2002). La psychologie cognitive au service de la conception de l'environnement d'apprentissage AMBRE. In *Proceedings of international symposium TICE 2002*, Lyon, France, 195-202.
- Novick, L. R. (1988). Analogical transfer, problem similarity, and expertise. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 14(3), 510-520.
- Novick, L. R., & Holyoak, K. J. (1991). Mathematical problem solving by analogy. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 398-415.
- Paas, F. (1992). Training strategies for attaining transfer of problem solving skill in statistics: a cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 84, 429-434.
- Paas, F., & Van Merriënboer, J. (1994). Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills: A cognitive-load approach.. *Journal of Educational Psychology*, 86, 122-133.
- Papert, S. (1987). Microworlds : transforming Education. In Lawler R. & Yazdani M. (Eds), *Artificial Intelligence in Education: learning environments and tutoring systems*. 1, Norwood, NJ: Ablex, 79-94.
- Patalano, A.L. & Seifert, C.M. (1994). Memory for impasses during problem solving. *Memory & Cognition*, 22 , 234-242.
- Perriault, J. (1989). *La logique de l'usage, essai sur les machines à communiquer*, Flammarion.
- Pirolli, P., & Anderson, J. R. (1985). The role of learning from examples in the acquisition of recursive programming skills. *Canadian Journal of Psychology*, 39,

240-272.

- Pirolli, P. & Recker, M. (1994). Learning strategies and transfer in the domain of programming. *Cognition and Instruction*, 12, 235-275.
- Pollock, E., Chandler, P. & Sweller, J. (2002) Assimilating complex information, *Learning and Instruction* 12, 61–86.
- PRC-IA 97. Conception d'Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur. Tendances et perspectives. Contribution du groupe EIAO coordonnée par Balacheff N., Baron M., Desmoulins C., Grandbastien M., Vivet M., In *Actes des journées nationales du PRC IA*, 1997, Grenoble, 315-338.
- Quilici, J. H. & Mayer, R. E. (2002). Teaching students to recognize structural similarities between statistics word problems. *Applied Cognitive Psychology*, 16, 325-342.
- Quilici, J.L., & Mayer, R.E. (1996). Role of examples in how students learn to categorize statistics word problems. *Journal of Educational Psychology*, 88, 144-161.
- Rabardel P. (1995). *Les hommes et les technologies, approche cognitive des instruments contemporains*. Paris, Colin.
- Reber, A. S. (1989). Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of Experimental Psychology: General*, 118, 219-235.
- Recker, M., & Pirolli, P. (1995). Modelling individual differences in students' learning strategies. *The Journal of the Learning Sciences*, 4, 1-38.
- Reed, S.K. (1987). A structure-mapping model for word problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 124-139.
- Reed, S.K. (1989). Constraints on the abstraction of solutions. *Journal of Educational Psychology*, 81, 532-540.
- Reed, S.K., & Bolstad, C.A. (1991). Use of examples and procedures in problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 753-766.
- Reeves, L.M., & Weisberg, R.W. (1994). The role of content and abstract information in analogical transfer. *Psychological Bulletin*, 115, 381-400.
- Reingold, E.M., Charness, N., Pomplun, M. & Stampe, D.M. (2001). Visual Span in Expert Chess Players: Evidence from Eye Movements. *Psychological Science*, 12, 49-56.
- Renkl, A. (1997). Learning from worked-out examples: A study on individual differences. *Cognitive Science*, 21, 1-29.
- Renkl, A. (2002). Worked-out examples: instructional explanations support learning by self-explanations. *Learning and instruction* 12, 529-556.
- Renkl A., & Atkinson, R. (2003). Structuring the transition from examples to problem solving in cognitive skill acquisition: a cognitive load perspective. *Educational Psychologist*, 38(1), 15-22.
- Renkl, A., Atkinson, R.K. & Grobe, C.S. (2004). How fading worked solution steps work – A cognitive load perspective. *Instructional Science*, 32, 59-82.
- Renkl, A., Atkinson, R.K., & Maier U.H. (2000). From studying examples to solving

- problems: Fading worked-out solution steps helps learning. In Gleitman L. & Joshi A.K.(Eds.), *Proceeding of the 22nd Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Mahwah, NJ: Erlbaum, 393-398.
- Renkl, A., Atkinson, R. K., Maier, U. H., & Staley, R. (2002). From example study to problem solving: Smooth transitions help learning. *The Journal of Experimental Education*, 70, 293-316.
- Renkl, A., Stark, R., Gruber, H., & Mandl, H. (1998). Learning from worked-out examples: The effects of example variability and elicited self-explanations. *Contemporary Educational Psychology*, 23, 90-108.
- Riesbeck, C., & Schank, R. (1989). *Inside Case-Based Reasoning*. Lawrence Erlbaum.
- Riley M.S, Greeno J.G. & Heller J.I. (1983). Development of children's problem-solving ability in arithmetic. In Ginsburg H.P. (Ed.) *The development of mathematical thinking*. New-York : Academic Press.
- Robert, A., Rogalski, J. & Samurçay R. (1987). Enseigner des méthodes. *Les cahiers de didactique*, 38. IREM de Paris 7 ed., Paris.
- Rogalski M. (1990). Enseigner des méthodes en mathématiques. Commission Inter-Irem Université, Enseigner autrement les mathématiques en Deug A première année, *bulletin Inter-Irem*, 65-79.
- Rogalski, M. (1994). Les concepts de l'EIAO sont-ils indépendants du domaine? L'exemple d'enseignement de méthodes en analyse. *Recherches en Didactiques des Mathématiques*, 14 (1/2), 43-66.
- Ross, B.H. (1984). Reminders and their effects in learning a cognitive skill. *Cognitive Psychology*, 16, 371-416.
- Ross, B.H. (1987). This is like that: The use of earlier problems and the separation of similarity effects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 629-639.
- Ross, B.H. (1989a). Distinguishing types of superficial similarities: Different effects on the access and use of earlier problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15, 456-468.
- Ross B. H. (1989b). Reminders in Learning and Instruction, In Vosniadou S. & Ortony A. (eds.), *Similarity and Analogical Reasoning*,. New York: Cambridge University Press.
- Ross, B.H., & Bradshaw, G.L. (1994). Encoding effects of reminders. *Memory & Cognition*, 22, 591-605.
- Ross, B.H., & Kennedy, P.T. (1990). Generalizing from the use of earlier examples in problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16, 42-55.
- Ross, B. H., & Kilbane, M. C (1997). Effects of principle explanation and superficial similarity on analogical mapping in problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23, 427-440.
- Rouet, J.-F., & Passerault, J.-M (1999). Analyzing learner hypermedia interaction: An overview of online methods. *Instructional Science*, 27, 201–219.
- Rumelhart, D.E. & Norman, D.A. (1981). Analogical processes in learning. In J.R.

- Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition*, Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Sander, E. (2000). *L'analogie, du naïf au creative*, Paris, l'Harmattan.
- Sander, E., & Richard, J. F. (1997). Analogical transfer as guided by an abstraction process: the case of learning by doing in text editing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23, 1459-1483.
- Sander, E., Levrat, B., Brissiaud, R., Porcheron, P., Richard, R. (2003). Conceptualisation et propriétés sémantiques des situations dans la résolution de problèmes arithmétiques : *rapport d'étape. Ministère de la Recherche ; appel d'offre 2002 Ecole et Sciences Cognitives : les apprentissages et leurs dysfonctionnements*.
- Schank, R.C. (1982). *Dynamic memory, a theory of reminding and learning in computers and people*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Schank, R.C. (1999). *Dynamic Memory Revisited*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Schank, R.C., and Abelson R.P. (1977). *Scripts, plans, goals, and understanding: An inquiry into human knowledge structures*. Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum.
- Schank, R., & Edelson, D. (1990). A Role for AI in Education: Using Technology to Reshape Education. *Journal of Artificial Intelligence in Education*, 1.2, 3-20.
- Schoenfeld, A. (1985). *Mathematical Problem Solving*, New York, Academic Press.
- Schneiderman, B. (1992). *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. Reading, MA : Addison-Wesley.
- Schoenfeld, A. H. & Hermann, D. J. (1982). Problem Perception and Knowledge Structure in Expert and Novice Mathematical Problem Solvers. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 8(5), 484-494.
- Senach, B. (1993). L'évaluation ergonomique des interfaces homme-machine. In J.-C. Sperandio (ed.), *L'ergonomie dans la conception des projets informatiques*,... Octares editions, 69-122.
- Shiri, A., Aimeur E., & Frasson C. (1988). SARA: A Cased-Based Student Modelling System. *Fourth European Workshop on Case-Based Reasoning, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 1488, Dublin, Ireland, 425-436.
- Shute, V. J., & Glaser, R. (1990). A large-scale evaluation of an intelligent discovery world: Smittown. *Interactive Learning Environments*, 1, 51-77.
- Shute, V.J., & Regian, J.W. (1993). Principles for evaluating Intelligent Tutoring Systems. *Journal of Artificial Intelligence and Education*, 4 (2/3), 245-271.
- Silver, E. A. (1979). Student perceptions of relatedness among mathematical verbal problems. *Journal for research in mathematics education*, 10(3), 195-210.
- Silver, E. A. (1981). Recall of mathematical problem information: Solving related problems. *Journal for research in mathematics education*, 12(1), 54-64.
- Soloway, E., Jackson, S.L., Klein, J., Quintana, C., Reed, J., Spitulnik, J., Stratford, S.J., Studer, S. (1996). Learning Theory in Practice: Case Studies of Learner-Centered Design. In Tauber, M.J., Bellotti, V., Jeffries, R., Mackinlay, J.D., Nielsen, J. (eds.), *Proceedings of the ACM CHI 96 Human Factors in Computing Systems Conference*, Vancouver, Canada, 189-196.

- Spencer, R., Weisberg, R. (1986). Context-Dependent Effects on Analogical Transfer. *Memory and Cognition*, vol. 14(5), pp. 442-449
- Squires, D., & Preece J. (1999). Predicting quality in educational software: Evaluating for learning, usability, and the synergy between them. *Interacting with Computer*, 11 (5), 467-483.
- Stark, R., Mandl, H., Gruber, H., & Renkl A. (2002). Conditions and effects of example elaboration. *Learning and Instruction*, 12, 39–60.
- Stark, R., Gruber, H., Renkl, A., Mandl, H., & Hinkofer, L. (1999). Lernen mit Lösungsbeispielen im Bereich des kaufmännischen Rechnens: Möglichkeiten der Optimierung einer Lernmethode. *Wirtschaft und Erziehung*, 51, 316-318.
- Stottler, R.H. & Ramachandran, S. (1999). A Case-Based Reasoning Approach to Internet Intelligent Tutoring Systems (ITS) and ITS Authoring. In *proceedings of FLAIRS Conference*, 181–186.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12, 257-285.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4, 295-312.
- Sweller J. (1999). *Instructional Design in Technical Areas*, Melbourne, ACER.
- Sweller, J., & Chandler, P. (1994). Why some material is difficult to learn. *Cognition and Instruction*, 12, 185–233.
- Sweller, J., Chandler, P., Tierney, P. & Cooper, M. (1990). Cognitive load and selective attention as factors in the structuring of technical material. *Journal of Experimental Psychology: General*, 119, 176-192.
- Sweller, J., & Cooper, G.A. (1985). The use of worked examples as a substitute for problem solving in learning algebra. *Cognition and Instructions*, 2, 59-89.
- Sweller, J., van Merriënboer, J.J.G., & Paas, F.G.W.C. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, 1(3), 251–296.
- Tarmizi, R., & Sweller, J. (1988). Guidance during mathematical problem solving. *Journal of Educational Psychology*, 80, 424-436.
- Tchounikine P. (2002a). Pour une ingénierie des environnement informatiques pour l'apprentissage humain. *Revue Information-Interaction-Intelligence*, 2(1), 59-95.
- Tchounikine P. (2002b). Conception des environnements informatiques d'apprentissage : mieux articuler informatique et sciences humaines et sociales. In Baron G.L. & Bruillard E. (eds.), *Les technologies en éducation : Perspectives de recherche et questions vives*, Paris, INRP - MSH - IUFM de Basse Normandie (ed), 203-210.
- Tourigny N. & Capus L. (2000). Towards Making Intelligent Training Systems Using Examples more Flexible and Reusable by Exploiting Case-Based Reasoning. In *Workshop Proceedings of ITS'2000 : Fifth International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, Montreal, 23–28.
- Trafton J.G. & Reiser B.J. (1993). The contribution of studying examples and solving problems to skill acquisition. In *Proceedings of the 15th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Hillsdale: Erlbaum, 1017-1022.

- Tricot, A. (1998). Charge cognitive et apprentissage. Une présentation des travaux de John Sweller. *Revue de Psychologie de l'Éducation*, 3, 37-64.
- Tricot (2003). IHM, cognition et environnements d'apprentissage. In G. Boy (Ed.), *L'ingénierie cognitive : IHM et cognition*, Paris : Hermès Science, 411-447.
- Tricot, A., Pierre-Demarcy, C., & El Boussarghini, R. (1998). Définitions d'aides en fonction des types d'apprentissages dans des environnements hypermédia . In J.-F. Rouet & B. de La Passardière (Eds.), *Hypermédiat et Apprentissages*, Paris, Presses de l'INRP / EPI, 41-58.
- Tricot, A., & Lafontaine, J. (2002). Une méthode pour évaluer conjointement l'utilisation un outil multimédia et l'apprentissage réalisé avec celui-ci. *Le Français dans le Monde*, 41-52.
- Trouche L. (2002). Génèses instrumentales, aspects individuels et collectifs. In Guin N. & Trouche L. (eds), *Calculatrices symboliques. Transformer un outil en un instrument du travail mathématique : un problème didactique*, la pensée sauvage édition, 243-275.
- Van Gog T, Pass, F. & Van Merriënboer, J.J.G. (2004). Process-Oriented Worked Examples: Improving Transfer: Performance Through Enhanced Understanding. *Instructional Science*, 32, 83–98.
- Van Merriënboer, J.J.G. & Kirshner, P. (2001). Three worlds of instructional design: state of the art and future directions, *Instructional Science*, 29, 429-41.
- Van Merriënboer, J.J.G., Kirschner, P.A., & Kester, L. (2003). Taking the load of a learner's mind: Instructional design for complex learning. *Educational Psychologist* 38(1), 5-13.
- Van Merriënboer, J.J.G., & Krammer, H.P.M. (1987). Instructional strategie and tactics for the design of introductory computer programming courses in high school. *Instructional Science*, 16, 251–285.
- Vergnaud, G. (1982). A classification of cognitive tasks and operations of the thought involved in addition and subtraction problems. In Carpenter P.T., Moser, J.M., & Romberg, T.A. (eds.), *Addition and subtraction: A cognitive perspective*, Hillsdale, Erlbaum, 39-58.
- Vergnaud G. (1985). Concepts et schèmes dans une théorie opératoire de la représentation. *Psychologie française*, 245-251.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: the development of higher psychological processes* (M. Cole, V. John-Steiner, S. Scribner, E. Souberman, Trans.). Cambridge, MA: Harvard University press.
- Ward, M. & Sweller, J. (1990). Structuring effective worked examples. *Cognition and Instruction*, 7, 1-39.
- Willis, G.B., & Fuson, K.C. (1988). Teaching children to use schematic drawings to solve addition and subtraction word problems. *Journal of Educational Psychology*, 80, 190-201.
- Wong, R.M.F., Lawson, M.J. & Keeves, J. (2002). The effects of self-explanation training on students' problem solving in high-school mathematics. *Learning and Instruction*, 12(2), 233-262.

Zhu, X., & Simon, H.A. (1987). Learning mathematics from examples and by doing.
Cognition and Instruction, 4, 137-166.

