

UNIVERSITE LUMIERE LYON 2
&
UNIVERSITE LUMIERE LYON 1

VALIDATION D'UN ENVIRONNEMENT INFORMATIQUE D'APPRENTISSAGE
HUMAIN FONDÉ SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS
POUR L'ENSEIGNEMENT DE MÉTHODES

MÉMOIRE DE DEA DE SCIENCES COGNITIVES

responsables de la formation :
Professeur Hélène PAUGAM-MOISY
&
Professeur Lionel COLLET

présenté par :

Sandra NOGRY

réalisé sous la direction des Maîtres de conférence:

Nathalie Guin-Duclosson et Stéphanie Jean-Daubias

au :

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes d'Information

Juillet 2001

REMERCIEMENT

Je tiens d'abord à remercier Nathalie Guin Duclosson et Stéphanie Jean Daubias pour m'avoir proposé un sujet aussi intéressant et pour avoir été disponibles tout au long de l'année en toutes circonstances.

Je voudrais remercier Jacques Poitevineau pour ses conseils en statistique et André Didierjean pour ces remarques intéressantes sur mon travail. Je voudrais également remercier Gilles Aldon et Mr Périchon pour avoir bien voulu participer à cette expérimentation.

Merci à Luc pour son aide technique et à tous les membres du LISI pour leur soutien, leur gentillesse et leur bonne humeur. Tout cela offre un cadre de travail très agréable.

Merci à Céline Quessada pour son aide et à Magalie Beldame et Nicolas Nova qui m'ont offert une bonne base pour commencer mon travail.

Et enfin, merci aux amis de sciences cognitives pour leur présence et pour les grandes discussions partagées ou pour les petits conseils.

RESUME

L'étude réalisée dans le cadre de ce DEA se situe dans le domaine de recherche des EIAH (Environnements Informatiques d'Apprentissage Humain). Cette étude est préalable à la conception d'un EIAH pour l'enseignement de méthodes fondé sur le RàPC (Raisonnement à Partir de Cas). On suppose que l'appel au RàPC, en facilitant la comparaison de problèmes, doit favoriser la formation par l'apprenant de classes de problèmes et d'outils de résolutions, et ainsi, permettre l'amélioration de ses performances. L'objectif de cette étude est de tester ces hypothèses avant la conception de l'EIAH dans sa totalité.

Pour cela, l'expérience proposée est une étude comparative de l'utilisation de deux maquettes (versions simplifiées de l'EIAH, nous les avons réalisées au cours de ce DEA) proposant des résolutions de problèmes en dénombrement. Une première maquette propose les étapes du RàPC pour guider la résolution, tandis que la seconde propose une résolution simple des mêmes exercices. Avant et après l'utilisation de ces maquettes, une tâche de catégorisation de problèmes permet d'observer la manière dont les apprenants classifient les problèmes et une tâche de résolution permet de mesurer leurs performances.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du paradigme de RàPC pour la résolution de problèmes n'entraîne pas une augmentation des performances de l'apprenant comparée à une résolution plus simple. Par ailleurs, l'utilisation de ce paradigme facilite la classification des problèmes, mais uniquement pour une partie des apprenants. Les autres semblent plutôt perturbés.

Ces résultats ne semblent donc pas valider nos hypothèses. Mais une analyse plus approfondie nous permet d'identifier certaines lacunes de la maquette. Cette première expérience nous permet donc de faire des propositions pour orienter la conception de l'EIAH afin qu'il facilite réellement l'enseignement de méthodes.

Mots clés : évaluation cognitive, EIAH, RàPC, comparaison d'exemples, induction de classes de problèmes.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	4
2. CADRE THEORIQUE.....	5
2.1. EIAH et apprentissage de méthodes	5
2.1.1. Définition et problématiques des EIAH	5
2.2. Utilisation du raisonnement à partir de cas.....	8
2.2.1. Raisonnement par analogie	9
2.2.2. Raisonnement à partir de cas.....	11
2.2.3. Lien entre RàPC et raisonnement par analogie intradomaine	12
2.3. Utilisations du RàPC en EIAH	13
2.3.1. RàPC pour résoudre des problèmes	13
2.3.2. RàPC pour modéliser les connaissances de l'apprenant.....	13
2.3.3. RàPC pour sélectionner une stratégie d'apprentissage.....	13
2.3.4. Construction d'un chemin dans un hypertexte.....	13
2.3.5. L'enseignement à partir de cas.....	14
2.4. Le projet AMBRE	14
2.5. Évaluation des EIAH.....	17
3. PROBLEMATIQUE.....	18
4. ÉVALUATION DE LA MAQUETTE	18
4.1. Principe de l'expérience	18
4.2. Méthode.....	19
4.2.1. Participants.....	19
4.2.2. Stimuli.....	19
4.2.3. Matériel.....	20
4.2.4. Procédure.....	20
4.2.5. Méthodes d'analyse	22
5. RESULTATS	22
5.1. Tâche de catégorisation	22
5.1.1. Prétest	23
5.1.2. Posttest.....	23
5.1.3. Comparaison entre prétest et posttest.....	24
5.1.4. Comparaison entre les conditions.....	25
5.1.5. Verbalisations associées aux classes de problèmes.....	25
5.2. Tâche de résolution de problème	26
5.2.1. Analyse des performances.....	26
5.2.2. Analyse des temps de réaction	27
5.3. Analyse des traces	27
6. DISCUSSION	32
6.1. Evolution des performances	32
6.1.1. Des résultats contrastés	32
6.1.2. Évaluation de la tâche proposée.....	33
6.1.3. Importance de l'ordre de présentation des exercices dans la maquette	33
6.2. Catégorisation des problèmes.....	33
6.2.1. Des résultats difficiles à interpréter.....	33
6.2.2. Difficulté à déterminer les traits structuraux.....	35
6.3. Évolution future de l'EIAH	37
6.3.1. Critique de la maquette.....	37
6.3.2. Conseils pour la conception.....	37
7. CONCLUSION.....	38

1. INTRODUCTION

Le travail proposé dans le cadre de ce DEA est préparatoire à la conception d'un Environnement Informatique d'Apprentissage Humain (EIAH) s'appuyant sur le paradigme de Raisonnement à Partir de Cas (RàPC) pour l'apprentissage de méthodes dans le cadre du projet AMBRE (Apprentissage de Méthode Basé sur le Raisonnement à partir de l'Expérience). Cette recherche s'inscrit dans le cadre de l'EIAH, domaine de recherche fortement pluridisciplinaire associant à la fois l'Intelligence Artificielle (IA), les sciences de l'éducation, la didactique des disciplines et la psychologie cognitive. La psychologie cognitive joue un rôle prépondérant en apportant des outils permettant d'évaluer rigoureusement les apprentissages.

Le RàPC est l'un des paradigmes proposés par l'IA pour la résolution de problème. Il a pour particularité de faire intervenir des cas déjà résolus pour résoudre un nouveau problème. Il intègre donc en lui-même un processus d'apprentissage.

Le projet AMBRE, développé dans l'équipe *cognition et expérience* du Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes d'Information, propose de mettre à profit ce paradigme pour développer un EIAH qui facilite l'apprentissage de méthodes. L'utilisation de cas pour résoudre des problèmes et la comparaison entre cas doit permettre à l'apprenant d'acquérir des connaissances abstraites.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de l'introduction du paradigme de RàPC sur l'apprentissage de méthodes. Notre travail a consisté à réaliser une maquette de L'EIAH AMBRE avant d'en faire une évaluation cognitive. Après une présentation plus détaillée du domaine des EIAH, du RàPC, et du projet AMBRE qui allie les deux, nous introduirons la problématique de notre étude avant de présenter l'expérience en elle-même, ces résultats et l'analyse que nous en faisons.

Enfin, nous proposerons quelques recommandations pour la conception du projet AMBRE.

2. CADRE THEORIQUE

Après avoir présenté le domaine des EIAH en lien avec l'apprentissage de méthodes, nous montrons en quoi le paradigme de RàPC peut être une approche intéressante dans le cadre d'un EIAH. Nous faisons ensuite une revue des travaux qui mettent en relation RàPC et EIAH, et enfin nous présentons d'une manière détaillée le projet AMBRE.

2.1. EIAH et apprentissage de méthodes

Dans cette section, nous faisons une rapide présentation du domaine de l'EIAH et de ses principales problématiques. Nous présentons ensuite des travaux qui modélisent le processus d'acquisition des connaissances et mettent en évidence l'importance de l'enseignement de méthodes. Enfin, nous montrons les liens qui existent entre EIAH et enseignement de méthodes.

2.1.1. Définition et problématiques des EIAH

Le champ de recherche qu'est l'EIAH (Environnement Informatique d'Apprentissage Humain) s'est développé à la fin des années 70 avec l'application de l'IA (Intelligence Artificielle) au domaine de l'éducation. Ce domaine de recherche a pour but la conception d'environnements informatiques d'apprentissage, généralement individuels, qui utilisent une représentation explicite des connaissances et une modélisation de l'apprenant pour proposer une intervention dynamique du système, adaptée à la situation et aux compétences de l'apprenant.

Ce champ de recherche nécessite la collaboration de disciplines aussi diverses que l'IA, la didactique des disciplines, les sciences de l'éducation et la psychologie cognitive, dans le but de définir les meilleures conditions pour favoriser l'apprentissage. Les sciences cognitives apportent des connaissances sur le fonctionnement cognitif en situation d'apprentissage, ainsi que des outils d'évaluation, la didactique des disciplines et les sciences de l'éducation apportent une réflexion approfondie sur les connaissances et leur enseignement. Enfin, l'IA propose toute une gamme d'outils pour offrir des interventions et des situations adaptées à l'apprentissage ainsi qu'une interaction souple entre l'apprenant et le système.

Les EIAH se basent sur plusieurs idées fondamentales :

- Le système doit contenir une représentation explicite des connaissances du domaine et des mécanismes de raisonnement. Il est ainsi doté de la capacité de répondre à des questions ou de

résoudre des exercices dont la solution n'a pas été prévue. Cette représentation explicite des connaissances est gérée par un résolveur. Pour que celui-ci soit adapté à un contexte de formation, il ne suffit pas qu'il soit un bon système expert (Clancey, 1983) ; il doit également proposer une explicitation du raisonnement qui a conduit à la solution dans un langage compréhensible par l'apprenant. Cette explication ne peut pas s'appuyer sur un résolveur non prévu pour l'EIAH (Delozanne, 1993). Il est à noter que les besoins d'explication sont spécifiques selon les domaines et les types d'activité envisagés (Rogalski, 1993).

- Le système doit construire un modèle de l'apprenant (par diagnostic) dans le but de disposer explicitement d'informations telles que le degré de maîtrise des connaissances du domaine, pour permettre l'adaptation dynamique et individualisée du système à l'apprenant. Le système pourra ainsi être évolutif en adaptant les connaissances de référence et le comportement du résolveur à la progression de l'apprenant.
- Une explicitation des stratégies pédagogiques doit aussi être disponible pour permettre au système de générer dynamiquement ses interventions en fonction de la situation, des objectifs pédagogiques et du modèle de l'apprenant.
- Les capacités de communication doivent être souples et rendre possible l'intervention et la prise d'initiative de l'apprenant. L'interface prend ici toute son importance.
- Les EIAH proposent généralement une approche constructiviste (Piaget, 1975) : l'apprenant construit lui-même ses connaissances à partir de ses connaissances précédentes en interagissant avec l'environnement.

L'EIAH proposé dans le projet AMBRE a pour but de guider l'apprenant dans une tâche de résolution de problèmes pour lui permettre de construire des représentations abstraites. Il se base sur le résolveur SYRCLAD (Guin, 1998) conçu spécifiquement pour assister l'apprentissage et fournir des explications à l'apprenant.

Pour mieux définir les bases théoriques de cet EIAH, nous prenons en compte à la fois les travaux en psychologie cognitive qui modélisent les processus d'acquisition, et les travaux en didactique des disciplines sur l'enseignement de méthodes.

2.1.1.1. Compréhension des processus d'acquisition des connaissances chez l'apprenant

La psychologie cognitive apporte des connaissances sur le fonctionnement cognitif des apprenants en situation d'apprentissage et durant le processus d'acquisition.

En particulier, les travaux de E. Cauzinille-Marmèche décrivent les différents niveaux de représentation des connaissances impliqués dans la résolution de problème (Cauzinille-Marmèche, 1988). Il existe trois niveaux de représentation des connaissances distincts :

- Le premier niveau de représentation consiste pour le sujet à associer des problèmes particuliers à des processus de résolution spécifiques. Ces processus spécifiques sont utilisés d'une manière automatique pour une situation particulière.
- À un second niveau de représentation, on ne considère plus les problèmes particuliers mais des classes de problèmes définies par un ensemble de propriétés nécessaires ou suffisantes, ou par des prototypes. Le sujet peut alors associer des plans d'actions aux classes de problèmes.
- Le troisième niveau correspond à l'acquisition, par le sujet, des concepts du domaine. Ce niveau est essentiel car ce sont les concepts du domaine qui guident le choix des descripteurs pertinents des situations.

La maîtrise de ces trois niveaux évolue en parallèle avec l'expertise. La différence entre individus novices et experts s'exprime d'une part par le nombre de liens qu'ils font entre problèmes particuliers et processus automatisés, et d'autre part par les concepts qu'ils maîtrisent et les liens qu'ils établissent entre ces concepts.

Encourager l'acquisition de connaissances consisterait donc non seulement à modifier et à enrichir la base d'exemples, mais aussi à permettre l'organisation des connaissances suivant un réseau structuré, et à encourager l'utilisation de ces connaissances.

De nombreux EIAH portent sur le développement de l'un de ces niveaux de représentation mais rares sont ceux qui font le lien entre ces niveaux.

Pour faciliter la transition entre ces niveaux, des études didactiques proposent de développer l'enseignement des méthodes. « Une méthode est la description d'un ensemble d'activités du sujet, portant sur l'analyse et le classement de problèmes à résoudre dans un domaine assez précis, l'utilisation des outils et des techniques disponibles, la gestion dans le temps des choix, des stratégies et de leur déroulement, la conscience de ces choix... Un algorithme produit une réponse, Une méthode fournit des questions : pourquoi, comment, par quels moyens... et donne des outils pour générer et contrôler la recherche des réponses.» (Rogalski, 1990).

Pour maîtriser des stratégies et un savoir-faire, l'apprenant a besoin d'acquérir des métaconnaissances, c'est-à-dire des connaissances sur ses connaissances. L'apprentissage de méthodes peut permettre de développer ces métaconnaissances en se basant sur la

classification des problèmes et des outils de résolution. L'acquisition d'une classification de ce type demande un apprentissage dynamique.

2.1.1.2. EIAH et apprentissage de méthodes

Un EIAH peut fournir un cadre adapté à l'enseignement de méthode, il peut proposer un apprentissage dynamique et agir aux différents niveaux de représentation des connaissances. Le logiciel ELISE est un exemple d'EIAH proposant un enseignement de méthode (Delozanne, 1992).

Plus précisément, un EIAH peut permettre de renvoyer un feedback à l'apprenant, pour lui permettre de déterminer quelles connaissances sont applicables, ce qui constitue une expérience métacognitive (Melot, 1991).

L'EIAH peut surtout apporter à l'apprenant des explications en situation : grâce au modèle de l'apprenant, le système peut analyser le type de stratégie mise en œuvre par l'apprenant et intervenir en adaptant le type d'explication à la situation.

Le projet AMBRE a pour but de favoriser l'acquisition de méthodes par la classification des problèmes et des outils de résolution. Le système doit permettre à l'apprenant de mettre lui-même en évidence les différentes classes de problèmes grâce à l'utilisation du raisonnement à partir d'exemples dans une situation de résolution de problème. En proposant à l'apprenant de reformuler le problème proposé et de le comparer aux problèmes déjà rencontrés, le système devrait favoriser l'acquisition de connaissances abstraites.

2.2. Utilisation du raisonnement à partir de cas

Pour induire chez l'apprenant un raisonnement à partir d'exemples, nous proposons d'utiliser le principe du RàPC comme fondement de l'EIAH AMBRE.

Le RàPC est un paradigme issu des recherches en IA sur la résolution de problèmes, basé sur la réutilisation d'exemples. Il a pour origine des études en psychologie cognitive portant sur les modèles de mémoire épisodique (Schank, 1982), ainsi que sur le raisonnement par analogie (Gentner, 1983). Le RàPC est une description computationnelle du raisonnement par analogie intradomaine (aussi appelé raisonnement à partir d'exemples), un paradigme beaucoup étudié en psychologie cognitive.

Après avoir montré le rôle du raisonnement par analogie dans l'apprentissage, nous détaillerons le lien entre RàPC et raisonnement par analogie, puis nous verrons comment ce paradigme peut être utilisé en EIAH.

2.2.1. Raisonnement par analogie

On peut définir le raisonnement par analogie comme la capacité à appréhender une situation nouvelle (cible) en la traitant comme une situation connue (source) (Sander, 2000). Lorsqu'on rencontre un problème nouveau, on a naturellement tendance à se référer à une situation proche déjà rencontrée pour résoudre ce problème.

De nombreuses études se sont intéressées à ce type de raisonnement en observant dans quelles situations il est utilisé et comment le problème source influence la résolution du problème cible.

VanLehn, dans une recherche en psychologie cognitive (VanLehn, 1996), a établi un modèle de l'acquisition des compétences qui intègre l'apprentissage à partir d'exemples. Ce modèle se décompose en trois phases :

- une phase précoce pendant laquelle l'apprenant essaie de comprendre les connaissances du domaine,
- une phase intermédiaire où l'apprenant s'entraîne à la résolution de problèmes, où il peut corriger ses connaissances erronées et acquérir des heuristiques,
- une phase tardive où il développe son expertise en augmentant son efficacité. VanLehn montre que c'est plutôt dans la phase intermédiaire qu'intervient l'apprentissage à partir d'exemples.

D'autres études montrent que l'analogie n'est pas toujours utilisée ou, au contraire, qu'elle est utilisée dans des situations où elle ne se justifie pas : la connaissance d'une solution source pertinente n'est pas une condition suffisante pour faire une analogie (Sander, 2000).

Le raisonnement par analogie en lui-même se décompose en différentes étapes qui varient selon les auteurs. Les principales étapes, accès à la source et mise en correspondance entre source et cible, sont toutefois reconnues par tous. Il existe également quelques études sur le transfert de la solution du problème source vers le problème cible (VanLehn, 1998). Dans les étapes d'accès à la source et de mise en correspondance entre source et cible, la question des similarités entre problèmes est centrale. Il existe deux types de similitudes : les similitudes de surface et les similitudes de structure. On peut définir les traits de surfaces comme les traits dont la modification n'a pas d'influence sur la réalisation du but ; la réciproque caractérise les traits de structure.

À travers quelques résultats expérimentaux, on peut voir l'importance de ces deux traits :

- **Accès à la source** : le fait de donner des consignes explicites (en demandant explicitement à l'apprenant d'établir un lien entre des problèmes) influence l'accès à la source, mais les traits de surface et de structure ont également un rôle déterminant (Ross, 1989). Pour Gentner, ce sont les traits de surface plus que de structure qui interviennent dans cette étape (Gentner, 1989). Les traits de structure ont un rôle d'autant moindre lorsque plusieurs sources sont en concurrence. Par ailleurs, l'accès à la source est également favorisé par des conditions d'apprentissage qui conduisent à l'induction d'un schéma entre deux cas analogues (Holyoak, 1985).
- **Utilisation de la source** : les traits de surface ne sont pas nécessaires dans cette étape, mais ils peuvent jouer un rôle. Les traits de structure, dans le sens de similitudes liées au but, ont eux une influence importante (Ross, 1989). D'autres critères entrent en jeu dans cette étape. Tout d'abord, le niveau d'expertise a un rôle important : en résolution de problème, lors de l'utilisation de la source, les novices utilisent plutôt les traits de surface alors que les experts utilisent surtout les traits de structure (Chi et al., 1981). De plus, les novices sont plus perturbés par une similitude des traits de surface. VanLehn observe aussi une corrélation entre la qualité de l'apprentissage et l'étude des exemples : les « bons » apprenants codent les exemples selon les buts réalisés (traits de structure) (VanLehn, 1996). Enfin, les connaissances antérieures sur la source ont également un effet sur le raisonnement par analogie : elles entraînent une prédominance relative des traits de structure ou de surface (Gentner, 1988).

D'une part ces études nous montrent que le raisonnement par analogie intervient dans le processus d'apprentissage, mais pas toujours d'une manière spontanée. Il est plus efficace si l'accès à la source est forcé (par exemple par une consigne explicite donnée par l'expérimentateur). D'autre part, le choix d'un type de similitude plutôt qu'un autre a un rôle central dans le raisonnement par analogie. L'utilisation des traits de structure est majeure dans l'expertise. Elle dépend des connaissances antérieures de l'apprenant sur les objets impliqués dans l'analogie.

L'abstraction joue également un rôle important : en effet, l'analogie est favorisée s'il existe un niveau d'abstraction de la source et de la cible. Si un schéma est préalablement construit, l'accès à la source est facilité (Holyoak & Thagard, 1989). Ce schéma peut résulter de connaissances préalables, mais il peut également résulter de la résolution passée des problèmes source. L'analogie peut donc induire des schémas. Certaines études montrent qu'elle peut également induire des catégories (Cummins, 1992).

La catégorisation et l'analogie semblent à première vue très éloignées : la catégorisation est classiquement vue comme une classification rigide et stable, indépendante du contexte (point de vue classique, e.g. Collins & Quillian, 1969). À l'inverse, l'analogie est perçue intuitivement comme très souple et incertaine ; c'est un processus de découverte de ressemblances. Mais d'autres recherches montrent que les catégories sont formées en interaction avec l'environnement ; elles sont flexibles et n'ont pas de frontières clairement définies (Barsalou & Médine, 1986). Les études qui mettent en évidence l'existence d'exemplaires plus ou moins typiques d'une catégorie (Rosch & Mervis, 1975) vont dans ce sens. De plus, un même objet peut être catégorisé de plusieurs manières suivant les connaissances du sujet, ses buts, les éléments du contexte... Enfin la catégorisation d'une situation nouvelle demande une flexibilité tout comme l'analogie. Ces deux processus ne sont donc pas si éloignés.

Des études expérimentales (Cummins, 1992) ont montré l'influence de l'analogie sur l'induction de catégories de problèmes. Les conclusions de cette étude montrent que l'apprentissage par analogie permet de discriminer entre plusieurs cas selon les traits de structure plutôt que selon les traits de surface, et apporte un bénéfice visible pour la classification de problèmes. De plus, il atténue la différence entre individus novices et experts. Cette étude montre toutefois que l'induction de catégories est également sensible à des influences top-down (influence des représentations de haut niveau sur les processus plus élémentaires) telles que les connaissances de l'élève sur le domaine.

En résumé, le raisonnement à partir d'exemples en résolution de problème permet :

- d'attirer l'attention de l'apprenant sur les traits de structure,
- d'avoir une représentation plus cohérente du problème,
- le développement d'une expertise basée sur les mêmes processus inductifs que la formation de concepts en général.

2.2.2. Raisonnement à partir de cas

Le paradigme de raisonnement à partir de cas a été développé au début des années 80 à partir de notions telles que le raisonnement par analogie, développées en psychologie cognitive et en IA. Le RàPC est, à cette époque, une approche originale car il introduit l'idée de la réutilisation de l'expérience dans le domaine de la résolution de problème en IA. On le formalise par un cycle de raisonnement comprenant cinq étapes :

- élaboration du cas (cible)
- remémoration d'un cas proche (source)

- adaptation de ce cas pour résoudre le problème cible
- révision du cas cible
- mémorisation ce cas cible

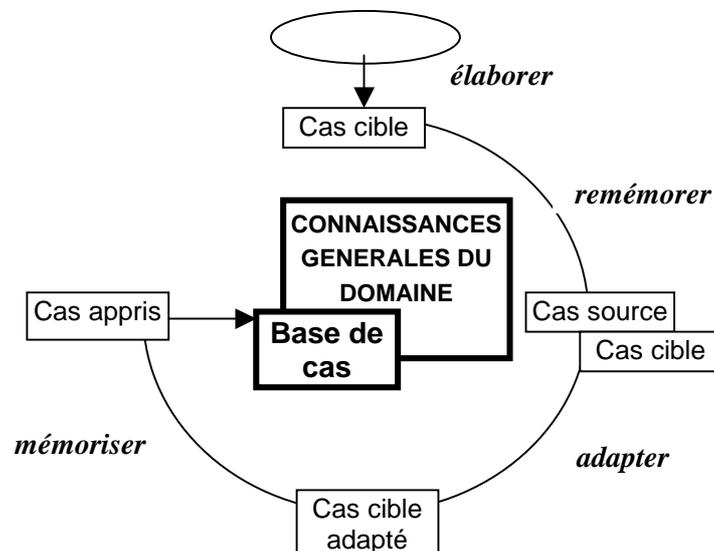


Figure 1 : cycle du raisonnement à partir de cas

À partir d'un problème cible, on élabore le cas à partir des connaissances générales en ne gardant que les informations pertinentes. Puis on remémore un cas proche en cherchant dans la base de cas. On adapte le cas remémoré si nécessaire, pour obtenir la solution du problème cible. Ensuite, le cas subit une révision si la solution proposée pour le problème cible est fautive et enfin on mémorise ce cas dans la base de cas pour une réutilisation future.

2.2.3. Lien entre RàPC et raisonnement par analogie intradomaine

Le RàPC est une description computationnelle du raisonnement par analogie intradomaine. C'est un paradigme bien établi en IA qui propose une description formelle du cycle de raisonnement, alors qu'en psychologie cognitive de nombreuses études se sont intéressées au raisonnement par analogie intradomaine, mais il n'y a pas de réel consensus entre les auteurs sur une représentation détaillée des étapes de ce paradigme.

Toutefois, il existe des liens importants entre ces deux approches. L'étape *d'accès à la source* du raisonnement par analogie est modélisée par l'étape de remémoration dans le cycle du RàPC. L'étape de *mise en correspondance* de la cible et de la source correspond à la première partie de l'étape d'adaptation (appelée appariement). Le *transfert* de la source vers la cible (VanLehn & Jones, 1993) ressemble à l'adaptation en elle-même. L'élaboration du cas présente dans le cycle du RàPC est totalement occultée en psychologie cognitive bien

qu'elle semble être prépondérante pour le déroulement des autres étapes (Sander, 2000, p.53). Les étapes de révision et de mémorisation ne sont pas d'avantage abordées.

Dans ces deux disciplines, des questions similaires se posent quant au choix des caractéristiques pertinentes à prendre en compte pour déterminer la similarité.

2.3. Utilisations du RàPC en EIAH

Le RàPC est une technique utilisée depuis quelques temps dans le domaine des EIAH. Il peut intervenir dans diverses composantes d'un EIAH.

2.3.1. RàPC pour résoudre des problèmes

Le résolveur de l'EIAH peut utiliser le RàPC comme principe de résolution. Une application possible consiste à proposer à l'apprenant non seulement la solution du problème comme dans un tuteur classique, mais aussi l'ensemble des étapes du cycle de RàPC que le résolveur a réalisées pour résoudre le problème donné. C'est ainsi que fonctionne le système CATO (Alevén & Ashley, 1997). CATO est un EIAH qui propose aux étudiants en droit une argumentation complète à partir d'études de cas. Le système de RàPC génère son argumentation à partir d'une base de cas. Toutes les étapes du cycle sont couvertes dans le but de montrer à l'apprenant le processus de raisonnement qui mène à la solution.

2.3.2. RàPC pour modéliser les connaissances de l'apprenant

Le logiciel SARA (Shiri & al., 1998) propose un problème à l'apprenant, ainsi qu'une base de cas et un ensemble d'outils pour adapter le cas source choisi et réviser la solution.

Le système compare ensuite la production de l'élève à la solution qu'aurait fourni l'expert s'il avait choisi le même cas. Le modèle de l'élève est ainsi construit à partir du cas choisi par l'élève, de l'adaptation et de la solution proposée.

2.3.3. RàPC pour sélectionner une stratégie d'apprentissage

Par comparaison du modèle de l'apprenant avec les évaluations d'autres apprenants (formant une base de cas), le RàPC peut également permettre la sélection d'une stratégie d'apprentissage (Gilbert, 2000).

2.3.4. Construction d'un chemin dans un hypertexte

Dans le cadre d'une navigation dans un hypertexte, le logiciel PIXED (Héraud, 2000) propose de mémoriser les parcours des utilisateurs précédents puis de proposer à l'utilisateur un parcours correspondant à sa situation en adaptant un des parcours de la base de cas.

2.3.5. L'enseignement à partir de cas

Les systèmes utilisés dans l'enseignement à partir de cas proposent un cas proche lorsque l'apprenant est en difficulté lors de la résolution, ou lorsqu'il est face à un problème jamais rencontré. Suivant les systèmes, l'apprenant peut demander au système de retrouver un cas similaire ou de lui expliquer comment le cas a été résolu (Schank & Edelson, 1990).

On peut prendre pour exemple le logiciel SPIEL (Burke & Kass, 1996) qui propose une aide pour l'apprentissage de conduites sociales adaptées par la remémoration de clips vidéo représentant des cas. La remémoration du clip peut intervenir tout au long de l'interaction entre l'étudiant et un logiciel de simulation, lorsque que le système détecte que l'étudiant a pris un risque ou a rencontré un échec dans l'interaction. Ce système a pour but de mettre en contact les étudiants avec l'expérience des experts.

C'est ce type de système qui est le plus proche de ce que nous voulons faire. Dans le cadre du projet AMBRE, l'apprenant doit choisir un cas proche dans la base de cas pour ensuite l'adapter pour la résolution du nouveau problème. La base de cas s'agrandit par la mémorisation des exercices que l'apprenant résout.

Le projet AMBRE est présenté plus précisément dans la section suivante.

2.4. Le projet AMBRE

Le projet AMBRE (Guin-Duclosson et al., 2001) a pour but de développer un système qui favorise la classification des problèmes et des outils de résolution en se basant sur la réutilisation de cas.

L'apprentissage de méthodes s'applique à certains domaines dans lesquels les apprenants éprouvent des difficultés à mettre en relation les cours théoriques avec la résolution de problèmes en pratique. Le raisonnement à partir de cas paraît donc approprié à ce type d'apprentissage.

Nous avons plus particulièrement choisi d'utiliser le domaine du dénombrement pour tester ce logiciel. En effet, l'enseignement de ce domaine est très théorique tandis que les exercices proposés sont très appliqués, et il est difficile de caractériser les savoirs implicites nécessaires à la résolution. De plus, ce domaine a fait l'objet de recherches didactiques qui ont permis de constituer une classification des problèmes et des outils de résolution (Guin,1998) (Annexe 1). Le dénombrement semble donc être un bon candidat pour l'apprentissage de méthodes.

Pour résoudre un problème, l'EIAH AMBRE guidera l'apprenant à travers les différentes étapes du RàPC.

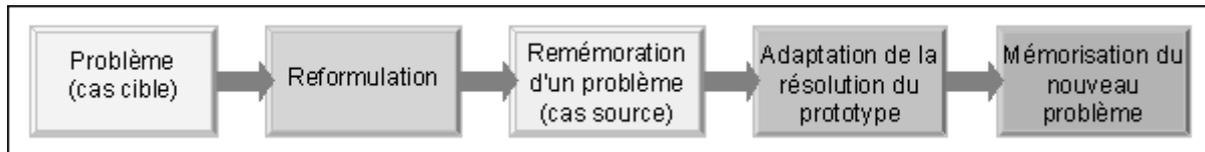


Figure 2 : étapes proposées dans le projet AMBRE pour guider l'apprenant

- **Élaboration du problème (cas cible) :** La première étape consiste à reformuler le problème à résoudre : le système aide l'apprenant à identifier les caractéristiques principales du problème à résoudre en lui demandant de déterminer les valeurs des attributs pertinents pour la résolution du problème (les traits de structure). Le système guide cette reformulation. Débarrassée de l'essentiel des traits de surface du problème, la reformulation devient une référence pour la suite de la résolution.
- **Remémoration d'un problème proche (cas source) :** La deuxième étape consiste à comparer le problème à résoudre à ceux déjà résolus. Les problèmes étant classés en groupes de problèmes représentés par un problème type, l'apprenant doit choisir le problème type qui lui semble le plus proche du problème à résoudre. Le système diagnostique la proposition de l'élève et propose éventuellement un meilleur choix en le justifiant, afin d'obtenir un accord avec l'élève sur un problème de référence.
- **Adaptation de la solution du cas source :** L'apprenant doit adapter la solution du cas source au cas cible en appliquant la technique de résolution du problème source au problème cible. Lorsque l'apprenant propose une adaptation débouchant sur une proposition de solution, le système diagnostique cette proposition et donne éventuellement des explications sur les corrections à effectuer pour obtenir une solution correcte.
- **Mémorisation du problème résolu dans la base de cas :** Une fois le problème résolu, l'étudiant doit l'ajouter à la base de cas, c'est-à-dire l'insérer dans l'organisation des problèmes qu'il a construite. Cette tâche consiste le plus souvent à associer le problème cible à l'un des problèmes types, donc à l'insérer dans un groupe de problèmes déjà existant. Un groupe de problèmes regroupe tous les problèmes qui se résolvent de la même manière. L'apprenant a la possibilité de modifier le problème type représentant le groupe de problèmes. Si le nouveau cas n'appartient pas à un groupe préexistant, l'apprenant peut alors créer un nouveau groupe représenté par le nouveau problème. L'apprenant peut également créer des sous-groupes de problèmes auxquels sont associées des méthodes de résolution plus spécifiques. Il faut par ailleurs donner à l'apprenant les outils qui lui permettront, s'il le

désire, de caractériser les groupes de problèmes les uns par rapport aux autres en constituant un début de hiérarchie.

La révision n'est pas prise en compte comme une étape à part entière dans AMBRE, mais intervient après chaque étape. En effet un feedback après chaque étape permet à l'apprenant de réajuster sa réponse.

De part le principe même du raisonnement à partir de cas, le système propose à l'apprenant un processus d'apprentissage. La vision des connaissances et de la compétence de résolution de problèmes tend à devenir de plus en plus dynamique à chaque nouveau problème, les connaissances pouvant s'enrichir et se réorganiser à chaque nouveau problème traité.

Pour que l'environnement puisse assurer les étapes décrites précédemment, l'architecture du système à développer sera constituée de différents modules en interaction :

- Le **module expert** contient une base de connaissances qui comprend la hiérarchie des classes de problèmes à enseigner et un résolveur qui utilise cette hiérarchie.
- Le **modèle de l'apprenant** contient une représentation de l'expérience de l'apprenant. Les traces de l'apprenant doivent être analysées pour interpréter son comportement.
- Le **module de diagnostic** analyse la validité des réponses de l'apprenant à chaque étape et fournit les données nécessaires au module d'aide et d'explication qui fournira la réponse adaptée.
- Le **module pédagogique** a pour rôle de choisir le problème à poser et le type d'aide adapté pendant la résolution.
- Le **module d'aide et d'explications** doit permettre de présenter des aides et des explications adaptées à l'apprenant.
- **L'interface** joue un rôle central car elle influence la qualité de la communication entre l'apprenant et les connaissances à enseigner. C'est elle qui permet d'accéder aux problèmes et aux outils mis à disposition par le système.

La conception d'un tel système doit être itérative. Elle nécessite différentes étapes de conception, de réalisation et d'expérimentations pour évaluer les solutions retenues et déterminer les améliorations à apporter (Jean, 2000). C'est pourquoi il est nécessaire d'évaluer l'utilisation des étapes du RàPC pour l'apprentissage de méthodes avant de mettre en œuvre tout le processus de conception.

Pour ce faire, nous avons réalisé cette année une maquette de l'EIAH AMBRE en utilisant l'environnement de développement Delphi 5. Cette maquette est un système simple

sans IA, seule l'interface présentant les quatre étapes est réellement construite, les autres modules étant simulés. Les corrections sont prédéfinies à l'avance, elles indiquent quelle erreur a été faite et donnent le plan de résolution de l'exercice si l'apprenant ne l'a pas trouvé. L'ordre de passation des exercices est également prédéterminé. Ce système est beaucoup plus rigide qu'un environnement d'apprentissage complet mais il est suffisant pour un premier test.

2.5. Évaluation des EIAH

L'évaluation d'un EIAH peut être de trois types : ergonomique, didactique ou cognitive.

L'évaluation ergonomique a pour but d'analyser l'utilisation d'un dispositif en situation de travail (Senach, 1990). Elle permet de détecter et de corriger les défauts éventuels de l'interface. Elle concerne principalement deux dimensions qui d'une part sont le respect du cahier des charges et donc des demandes du client (l'utilité) et d'autre part la facilité d'utilisation (l'utilisabilité). La qualité d'une interface homme-machine dépend de sa facilité d'apprentissage et d'utilisation.

L'évaluation didactique consiste à observer l'apprenant en situation d'apprentissage pour déterminer l'influence du système sur ses connaissances. L'analyse porte sur des thèmes tels que l'influence de la transposition des connaissances par le système informatique ou l'interaction entre le système et l'apprenant (Balacheff, 1994; Artigue, 1995), ou encore l'intégration de l'outil dans la classe. (Baron et al., 1997).

L'évaluation en psychologie cognitive a quant à elle pour but de mieux comprendre le fonctionnement cognitif de l'apprenant et l'influence que peut avoir l'EIAH sur la conceptualisation et l'apprentissage. Les principales études réalisées portent sur le diagnostic ou sur la compréhension des stratégies d'apprentissages. La plupart des études proposent des analyses comparatives de séquences d'apprentissage et cherchent à mettre en évidence l'amélioration des performances.

Ces différentes approches sont complémentaires, elles utilisent souvent des méthodes différentes, mais apportent des informations complémentaires sur l'utilisation du système et sur l'influence qu'il peut avoir sur l'apprenant.

Dans le cadre de notre étude, il n'est pas indispensable que la maquette soit entièrement validée d'un point de vue ergonomique et didactique. Elle a cependant été conçue en respectant les critères ergonomiques de Bastien & Scapin (1993) et elle s'appuie sur des travaux didactiques sérieux (Le calvez et al., 1997).

Dans cette étude, nous proposons donc uniquement une évaluation cognitive sur la base d'une étude comparative en situation d'apprentissage.

3. PROBLEMATIQUE

Comme on l'a vu précédemment, l'EIAH réalisé dans le cadre du projet AMBRE se base sur le paradigme de RàPC dans le but de développer la capacité des apprenants à classifier les problèmes et ainsi à mieux les résoudre, les apprenants ayant déjà au préalable des connaissances sur le domaine. L'expérience proposée a donc pour but d'étudier la maquette de cet EIAH en situation d'apprentissage pour mesurer son impact sur l'apprentissage de méthodes. Deux hypothèses sont plus précisément testées :

- cet EIAH facilite l'induction de catégories de problèmes,
- il permet d'améliorer les performances de l'apprenant lors de la résolution de problèmes.

Pour étudier l'impact de la maquette sur les capacités de catégorisation de problèmes des apprenants, l'observation des similitudes utilisées par les apprenants pour classifier les problèmes semble un bon indice. La comparaison des types de similitudes utilisées avant et après l'utilisation de la maquette permet de mettre en évidence l'évolution de la catégorisation chez l'apprenant.

4. ÉVALUATION DE LA MAQUETTE

4.1. Principe de l'expérience

Pour tester les hypothèses proposées, une analyse comparative de la maquette construite avec une maquette simplifiée est mise en oeuvre. La condition contrôle choisie est l'utilisation d'une seconde maquette qui propose seulement l'étape de résolution et non les différentes étapes du RàPC. Cette condition doit permettre de vérifier que les variations de performances sont bien dues à l'utilisation du RàPC (qui a pour spécificité de demander à l'apprenant de reformuler le problème et de rechercher un problème proche pour en adapter la solution), et pas seulement à l'entraînement répété à la résolution de problèmes dans un environnement informatique. Il existe donc deux versions de la maquette : l'une, complète, comporte les quatre étapes de résolution en s'appuyant sur le cycle du RàPC, l'autre, incomplète, comporte uniquement l'étape de résolution de problème dans le même environnement, sans guidage spécifique. Nous les nommerons par la suite maquette RàPC et maquette contrôle.

Lors de l'expérience, les participants sont soumis à deux tâches papier-crayon présentées à la fois avant et après l'utilisation du logiciel. La première tâche correspond à la catégorisation d'énoncés de problèmes, la seconde est une tâche de résolution d'exercices. Avant l'utilisation de la maquette (en prétest), ces tâches doivent permettre d'évaluer le niveau des élèves, tandis qu'à l'issue de l'utilisation de la maquette (en posttest), elles indiquent l'évolution des performances de résolution de l'élève et de sa capacité à catégoriser les exercices.

On s'attend à ce que l'utilisation de la maquette RàPC change qualitativement la nature de la catégorisation : les énoncés d'exercices devraient être préférentiellement catégorisés suivant leur traits structuraux. Dans les autres cas, avant l'utilisation du prototype et dans la condition contrôle, la catégorisation devrait se faire plutôt selon les traits de surface, non pertinents dans la résolution.

4.2. Méthode

4.2.1. Participants

L'expérimentation a été réalisée en plusieurs séances en classe avec au total 64 participants âgés en moyenne de 18 ans. 63 participants sont élèves de 2 classes de terminale scientifique des lycées Lacassagne à Lyon et Jacques Brel à Vénissieux. Le professeur leur a expliqué qu'ils participaient à l'expérimentation d'un nouveau logiciel de dénombrement. Le dernier participant a passé un Baccalauréat scientifique l'an dernier. Tous les participants possédaient déjà de bonnes notions sur le domaine.

4.2.2. Stimuli

Pour faciliter la conception de la maquette, nous avons choisi de nous centrer plus particulièrement sur l'une des classes du domaine des dénombrements, la classe des exercices de répartition. Cette classe est divisée en trois sous-classes appelées *ensemble*, *liste avec remise*, *liste sans remise*. (Hiérarchie des classes et exemples d'exercices disponibles en annexe 1). La maquette propose au total 10 exercices de dénombrement appartenant à ces trois sous-classes : 3 exercices du type *liste avec remise*, 3 exercices du type *liste sans remise*, 4 exercices du type *ensemble* (exemples d'exercices en annexe 3). Tous les exercices sont tirés de la thèse de N. Guin (Guin, 1998). Les traits de surface des exercices de la maquette sont de 4 types : *jeu de carte*, *jetons*, *lettres*, *chiffres*. La catégorie d'un problème est indépendante de ses traits de surfaces : des problèmes ayant des traits de surface similaires peuvent appartenir à des catégories de problèmes différents. L'ordre de présentation des exercices tient compte

du mélange des traits de surface et des catégories d'exercices, suivant un niveau de difficulté croissant.

Dans la tâche de résolution d'exercices, deux exercices de niveaux de difficulté différents et appartenant à des sous-classes différentes sont présentés. L'exercice 2 est considéré comme l'exercice le plus difficile parce qu'il contient des contraintes.

La tâche de catégorisation comprend, elle, dix énoncés d'exercices représentatifs des trois sous-classes de problèmes de la classe répartition et d'une nouvelle classe de problème (spectre). Ils sont caractérisés par cinq traits de surface : *jeu de carte*, *jetons*, *lettres*, *chiffres* dans le prétest et le posttest, *dés* dans le prétest et *groupes d'élèves* dans le posttest (deux exercices par trait de surface) (descriptif de ces exercices en annexe 4). Si, en posttest, la catégorisation tient compte des traits de structure, on pourra voir si elle s'applique seulement aux exercices de mêmes traits de surface que ceux de la maquette ou si elle se généralise à d'autres exercices en observant comment sont classés les exercices ayant pour traits de surface *groupes d'élèves* (trait de surface non présent dans la maquette).

4.2.3. Matériel

L'expérimentation se déroule dans les salles informatiques des lycées. La maquette RàPC et la maquette contrôle sont installées sur les ordinateurs.

Les prétest et posttest sont proposés sur papier, afin de mesurer les progrès dus à l'apprentissage et non à la maîtrise de l'environnement informatique.

Une première feuille propose les énoncés des deux exercices à résoudre. Une deuxième feuille permet de répondre à la tâche de catégorisation en classifiant d'abord les énoncés par groupes, puis en proposant une description sommaire de ces groupes. Les énoncés à catégoriser sont inscrits sur des cartes et sont identifiés par un numéro écrit au verso.

4.2.4. Procédure

Le test se déroule en groupes de 16 personnes dans la salle informatique du lycée pendant le créneau de 2 heures du cours de mathématiques pour se placer dans des conditions naturelles d'utilisation. Chaque élève dispose d'une machine. Nous étions deux expérimentateurs présents dans la salle pour répondre à d'éventuels problèmes techniques.

Les participants sont répartis aléatoirement dans 2 groupes de 32 participants, le groupe test (GT) et le groupe contrôle (GC). Chaque groupe est divisé en 4 sous-groupes de 8

participants pour lesquels l'ordre de réalisation des tâches de résolution de problème et de catégorisation varie suivant le principe du carré latin.

L'expérience se déroule en trois parties (figure 3) :

- **Prétest**

Les participants ont 10 minutes pour résoudre deux exercices en donnant le plan de résolution et l'équation de résolution, le temps de résolution de chaque exercice est chronométré. Ils disposent également de 15 minutes pour catégoriser, suivant la similarité de leur résolution, les 10 énoncés d'exercices disposés devant eux, sans contrainte sur le nombre de groupes à former. Les participants doivent ensuite expliquer en quoi les exercices regroupés sont similaires (consignes en annexe 2). L'ordre de ces deux tâches dépend des groupes.

- **Phase d'entraînement avec le prototype**

Cette deuxième phase consiste à résoudre les exercices proposés en utilisant la maquette de l'EIAH.

Les apprenants ont 55 minutes pour lire la résolution de trois exercices représentatifs des trois sous-classes de problèmes traités dans le logiciel, puis pour résoudre sept exercices proposés dans un ordre prédéfini. Les trois exercices résolus sont présentés en respectant les étapes de la maquette proposée, ils constituent la base de cas initiale et représentent les problèmes types déjà rencontrés.

Dans le groupe test, les participants doivent d'abord reformuler le problème. Le logiciel les guide pour identifier les caractéristiques pertinentes pour la résolution et leur demande de définir la valeur de ces différents attributs. Puis ils doivent ensuite rechercher un problème proche dans la liste des problèmes types représentatifs des problèmes déjà rencontrés. La phase de résolution consiste alors à adapter le plan de résolution du problème choisi pour construire le plan de résolution du problème posé, à l'aide de briques de construction, chaque brique correspondant à une phrase type à compléter. Dans une dernière étape, le problème résolu doit être classé parmi les problèmes déjà rencontrés. Un feedback est donné à l'issue de chaque étape : il indique les erreurs éventuelles et donne le plan de résolution correct à l'issue de la résolution.

Dans la condition contrôle, les participants construisent par eux-mêmes le plan de résolution grâce aux mêmes briques de construction mais sans les étapes précédentes. Un feedback est également rendu à la fin de la résolution en proposant un plan de résolution correct.

À l'issue de la séance, nous recueillons un fichier de traces d'utilisation du logiciel pour chaque participant. Ces traces n'ont été recueillies que pour la moitié des apprenants.

- **Posttest**

La procédure est identique au prétest : les participants travaillent sur deux exercices à résoudre et une tâche de catégorisation, les exercices proposés étant différents de ceux proposés lors du prétest pour les deux tâches.

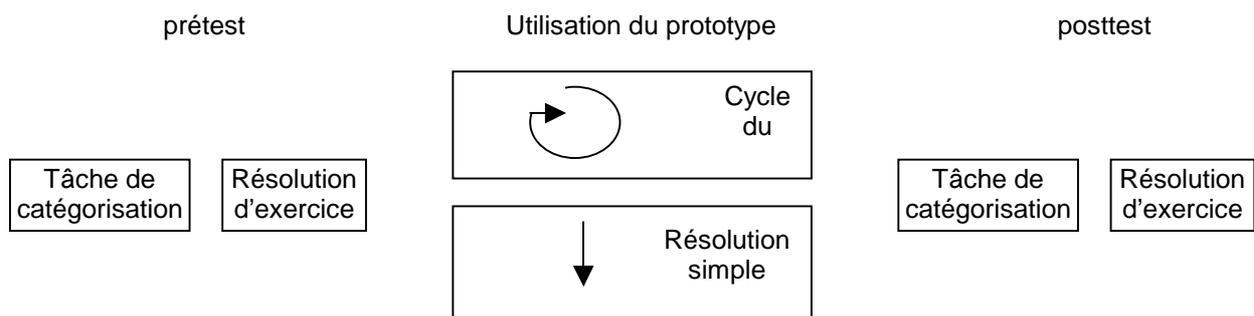


Figure 3 : Plan expérimental.

4.2.5. Méthodes d'analyse

Pour la tâche de catégorisation, les résultats bruts obtenus sont préparés pour l'analyse à l'aide du logiciel *catégor*. Lorsque les participants n'ont pas classé tous les énoncés, les données manquantes sont complétées en créant pour chaque énoncé non classé une nouvelle classe. Ensuite les fichiers sont sauvegardés et analysés par une taxinomie de Barthélémy et Guénoche, qui permet de créer des arbres. Ces arbres sont visualisés sur le logiciel Njplot (Perrière & Gouy, 1994).

Pour la tâche de résolution d'exercices, nous avons attribuer un 0 si le plan était faux et un 1 s'il était juste. Les réponses sont ensuite traitées par une analyse de variance sur le logiciel *sysstat*.

Enfin, les traces sont analysées pour observer les conditions d'utilisation du logiciel et déterminer le type d'erreurs les plus fréquentes.

5. RESULTATS

5.1. Tâche de catégorisation

Pour analyser ces résultats nous avons choisi d'utiliser la taxinomie de Barthélémy et Guénoche (Barthélémy & Guénoche, 1991). Cette méthode permet de faire émerger des classes d'items d'après les classifications proposées par plusieurs participants. Plus

précisément, cette méthode consiste à calculer une matrice de distances entre tous les items pour ensuite faire une analyse de proximité. Les arbres obtenus permettent de visualiser la proximité entre les items. La qualité de la représentation obtenue est évaluée par plusieurs paramètres tels que le stress qui évalue la qualité de la mesure de proximité (une représentation de très bonne qualité correspond à une valeur de stress inférieure à 5%) et le taux de quadruplets bien représentés qui évalue la qualité de la structure de l'arbre (une bonne approximation de la structure de l'arbre correspond à une valeur minimum de 0.80).

Pour nos données, nous pouvons estimer que les représentations obtenues sont de qualité moyenne. Il faut donc rester critique quant aux résultats. Lorsque la représentation de l'arbre est faible, seule une partie de l'arbre est bien représentée ; nous n'analyserons dans ce cas que cette partie. Le stress a une valeur moyenne de 11% dans toutes les conditions. Dans la condition test et dans la condition contrôle, pour le prétest, le taux de quadruplets bien représentés est d'environ 75%. En revanche, dans la condition contrôle pour le posttest, il est de 87%.

Nous allons maintenant détailler les classes représentées par les arbres pour le prétest et pour le posttest dans chacune des conditions.

5.1.1. Prétest

L'arbre issu des résultats du prétest met en évidence trois groupes d'exercices distincts. Cependant, la taille des feuilles de cet arbre est très grande par rapport aux branches (ratio interne/externe=0.14), les groupes sont donc peu marqués. Un premier groupe rassemble les exercices 9 et 10, le second groupe comprend les exercices 1 et 3 et le troisième groupe est composé des exercices 5 et 7. On observe également une proximité entre les exercices 2, 4 et 8 mais elle est moins marquée que pour les autres groupes. Les exercices 9 et 10 ont pour point commun le trait de surface *cartes*. Les exercices 1 et 3 d'une part, et 5 et 7 d'autre part, appartiennent tous à la même classe de problème : *liste avec remise*. Les exercices 2, 4 et 8, eux, appartiennent à la classe *liste sans remise*.

Cet arbre nous montre donc que la classe *liste avec remise* et le trait de surface *cartes* semblent assez bien distingués par les participants. Un rapprochement entre les exercices de la classe *liste sans remise* est suggéré mais reste très peu marqué.

5.1.2. Posttest

Lors du posttest, dans la condition contrôle, on observe deux groupes bien différenciés qui s'opposent. Composés des exercices 1 et 7 d'une part, et 3 et 4 d'autre part, ces deux

groupes sont caractérisés l'un par la classe *liste sans remise* et l'autre par le trait de surface *groupes d'élèves*. Un groupe plus vaste non définissable rassemble tous les autres exercices.

Dans la condition test, les groupes sont assez saillants ; le rapport entre la taille des branches et celle des feuilles est meilleur que dans les autres conditions (ratio interne/externe=0.45). Trois groupes de deux exercices apparaissent contenant les exercices 3 et 4, 9 et 10, et 6 et 8. Ces exercices sont liés par les traits de surfaces *groupe d'élève* et *cartes* pour les deux premiers groupes. Les exercices du troisième groupe appartiennent à la classe *liste avec remise*.

L'analyse de l'arbre indiquant la répartition des sujets montre deux groupes distincts dans cette condition. Nous avons donc construit les arbres correspondant aux réponses de ces deux sous-groupes. Les classes présentes dans ces arbres sont saillantes (le ratio interne/externe est égal à 1.27 pour le premier arbre et à 0.63 pour le second).

L'analyse du premier arbre fait ressortir trois groupes. Le premier groupe comprenant les exercices 2, 8 et 6 est caractérisé par la sous classe *liste avec remise*. Le second groupe comprend les exercices 9 et 10 qui ont pour trait de surface *carte*, enfin un troisième groupe rassemble les exercices 3, 4 et 5. Les exercices 3 et 4 ont le même trait de surface (*groupe d'élèves*) et les exercices 4 et 5 appartiennent à la même sous-classe (*ensemble*).

L'analyse du second arbre fait également ressortir trois groupes. Les exercices 3 et 4 qui composent le premier groupe ont pour trait de surface *groupes d'élèves*. Les exercices 9, 8 et 10, et 7 et 2, forment les deux autres groupes. Aucune caractéristique particulière ne permet de définir ces groupes.

5.1.3. Comparaison entre prétest et posttest

La comparaison entre prétest et posttest dans la condition contrôle montre qu'un groupe caractérisé par la classe *liste sans remise* est présent dans les deux cas. Les groupes caractérisés par le trait de surface *cartes* et par la classe *liste avec remise* présents dans le prétest ne se retrouvent pas dans le posttest.

Dans la condition RàPC (utilisation de la maquette RàPC), lors du posttest, les groupes sont plus saillants que dans le prétest. Comme dans le prétest, on retrouve dans cette condition deux groupes, l'un caractérisé par la classe *liste avec remise* et l'autre par le trait de surface *cartes*. Les groupes déjà obtenus dans le prétest semblent donc être renforcés.

La comparaison des résultats entre tests des sous-groupes de sujets montre, dans le cas du sous-groupe 2, qu'un groupe d'exercices (exercices 5 et 7) qui apparaît dans le prétest (correspondant à la classe *liste avec remise*) ne se retrouve pas dans le posttest. Dans le cas du

sous groupe 1, l'analyse de l'arbre représentant les résultats du prétest est impossible en raison de la mauvaise qualité de l'arbre (stress=26%).

5.1.4. Comparaison entre les conditions

On peut comparer les arbres représentant les réponses au posttest dans la condition RàPC et dans la condition contrôle.

Le groupe représenté par le trait de surface *groupes d'élèves* est présent dans les deux conditions. Les groupes caractérisés par les sous-classes *liste avec remise* et *ensemble* et par le trait de surface *cartes* et ne sont présents que dans la condition RàPC (et dans l'un des sous groupes de sujet pour la classe *ensemble*).

La qualité de la représentation de l'arbre de la condition RàPC ne permet pas de savoir si le groupe caractérisé par la classe *liste sans remise*, présent dans la condition contrôle, se retrouve dans l'autre condition.

5.1.5. Verbalisations associées aux classes de problèmes

Nous avons demandé aux participants de caractériser les regroupements de problèmes. Une première analyse des verbalisations obtenues a permis de mettre en évidence huit types de réponses caractéristiques (tableau I). Une analyse quantitative et qualitative sommaire a ensuite été faite sur ces données.

Types de verbalisation	prétest	posttest	
		condition contrôle	condition RàPC
traits de surface	0,07	0,06	0,14
exemples particuliers	0,03	0,01	0,01
phrases types	0,01	0,00	0,07
citation de parties d'énoncé	0,01	0,01	0,00
allusion aux contraintes	0,06	0,06	0,14
référence aux caractéristiques des classes de problèmes	0,23	0,17	0,22
référence aux symboles utilisés dans les équations numériques	0,36	0,47	0,31
référence aux symboles et aux caractéristiques des classes	0,16	0,14	0,01

Tableau I : Moyenne des occurrences des différents types de verbalisation

L'analyse quantitative montre que, d'une manière générale, les dénominations les plus fréquentes font référence aux symboles utilisés dans l'équation numérique (permutation (P), combinaison (C), arrangement (A)) puis aux caractéristiques du problème. La comparaison entre tests montre, pour la condition contrôle, une diminution de la fréquence des références aux traits de structure du problème et une augmentation de la référence aux symboles de l'équation. Pour la condition RàPC, on observe une diminution de la référence conjointe aux

symboles et aux caractéristiques de la classe. Il y a, à l'inverse, une augmentation de la fréquence des occurrences se référant aux traits de surface, aux phrases types ainsi qu'aux contraintes.

L'observation des différences qualitatives entre tests et entre conditions montre que dans la condition RàPC, on retrouve plus souvent qu'ailleurs le vocabulaire utilisé lors de l'étape de reformulation.

Il est à noter que la verbalisation proposée par l'apprenant pour caractériser un groupe ne correspond pas toujours aux caractéristiques réelles des problèmes appartenant à ce groupe (par exemple, certains apprenants désignent un groupe par la caractéristique *avec répétition* alors que seul l'un des éléments de ce groupe correspond à cette caractéristique).

5.2. Tâche de résolution de problème

5.2.1. Analyse des performances

La tâche de résolution de problème était proposée dans les deux conditions (condition contrôle et condition RàPC) et consistait à résoudre deux exercices, un exercice facile et un exercice difficile, lors du prétest et du posttest. On procède à une analyse de variance pour déterminer les effets simples et les interactions entre ces variables. Une différence est considérée comme significative lorsque $p < 0.05$.

Les analyses de variances sur ces performances ne montrent pas d'effet simple de la Condition ($F(1,254)=0.000$, non significatif) et pas non plus d'effet simple des Exercices : ($F(1,254)=1.000$, ns).

Une analyse plus détaillée met en évidence une tendance à une différence entre exercices pour le prétest ($F(1,126)=3.182$, $p=0.077$) : lors du prétest, l'exercice 2 désigné comme étant plus difficile semble moins bien réussi, la moyenne des résultats est de 0.641 pour l'exercice 1 contre 0.453 pour l'exercice 2. Une différence significative des résultats entre les exercices 1 et 2 apparaît lors le posttest ($F(1,126)=10.834$, $p=0.01$). Dans ce cas, les résultats de l'exercice 2 (moyenne : 0.672) sont significativement meilleurs que ceux de l'exercice 1 (moyenne : 0.469). Nous ferons donc des analyses séparées pour les deux exercices.

L'analyse de l'interaction entre Exercices et Tests fait ressortir une différence significative entre le prétest et le posttest uniquement pour l'exercice 2 : $F(1,62)=6.216$, $p=0.015$. La moyenne des performances passe de 0.453 à 0.672 entre le prétest et le posttest.

L'analyse comparée du prétest et du posttest par Condition fait ressortir une différence significative ($F(1,30)=6.283, p=0.018$) pour la condition RàPC et uniquement pour l'exercice 2.

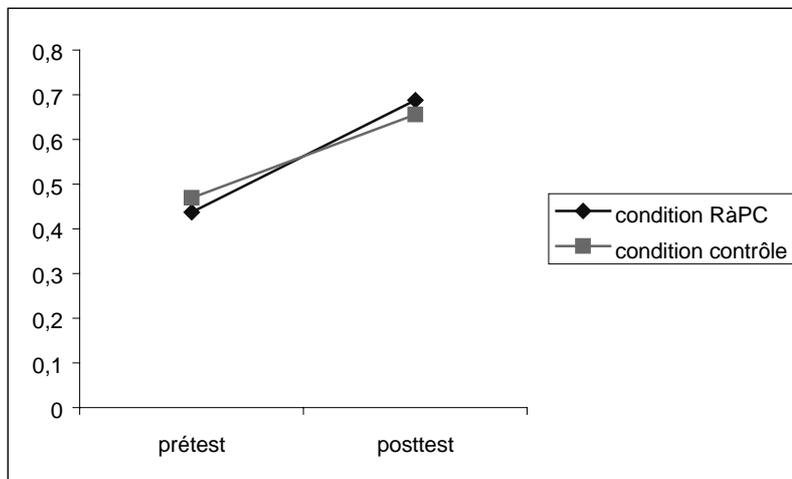


Figure 4 : performances pour la résolution de l'exercice 2 , dans les deux conditions

Contrairement à nos hypothèses, l'analyse comparée des Conditions lors du posttest ($F(1,126)=0.041, ns$) ne fait pas ressortir de différences (figure 4). Il ne ressort pas d'avantage de différences lorsqu'on fait la même analyse par exercices (comparaison entre conditions pour le posttest et pour l'exercice 2 ($F(1,62)=0.069, ns$)). Ces résultats ne nous permettent donc pas de penser que la condition RàPC produit de meilleurs résultats que la situation contrôle.

Les résultats ci-dessus montrent donc une différence entre les exercices 1 et 2. On observe également une amélioration des performances entre prétest et posttest mais uniquement pour l'exercice 2 et plus spécifiquement dans la condition RàPC. Mais on n'observe pas de différence significative lors du posttest entre conditions.

5.2.2. Analyse des temps de réaction

Le taux d'erreurs des exercices étant très élevé (supérieur à 50% dans certains cas), l'analyse de temps de réaction n'est pas possible. En effet, il serait nécessaire de compléter jusqu'à 50% des données pour faire des analyses de variance, et les résultats s'en trouveraient faussés.

5.3. Analyse des traces

À partir des fichiers de traces de chaque participant, on peut extraire différentes données sur l'utilisation de la maquette RàPC. Nous avons choisi de nous intéresser plus

particulièrement au temps passé pour chaque étape et pour résoudre chaque exercice, au nombre et aux types de messages d'erreurs, et au type de mémorisation choisie (association à un exercice type ou ajout d'un nouvel exercice type).

Tous les apprenants ont résolu l'exercice 4 dans le temps imparti, mais seuls 50% d'entre eux ont fini l'exercice 5 et 30% ont été au bout de l'exercice 6. Tous les résultats présentés ici sont à considérer comme des tendances car les écarts types sont assez grands.

Le temps passé par exercice diminue progressivement au cours des exercices, il est divisé par trois, entre le premier et le dernier exercice (figure 4). On remarque toutefois un palier entre les exercices 4 et 5.

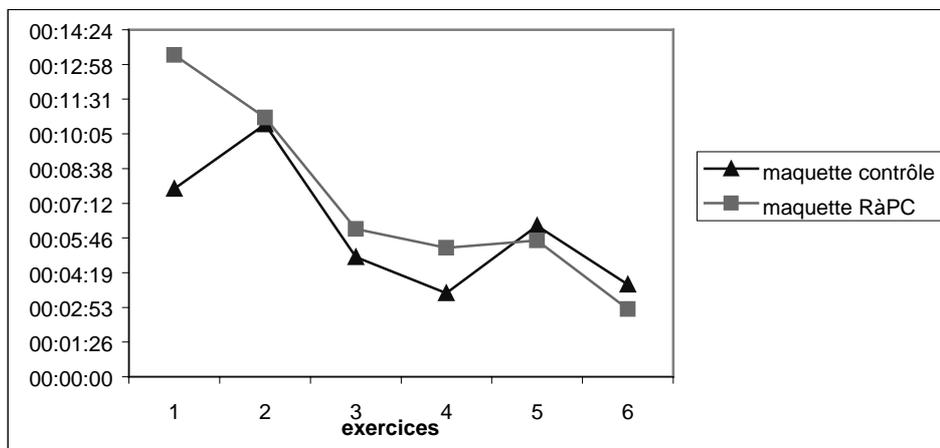


Figure 5 : Temps de résolution en fonction des exercices

En comparant le temps passé par exercice dans la maquette RàPC et dans la maquette contrôle, on observe que le temps moyen par exercice est sensiblement identique (6 mn 53 pour la maquette RàPC et 6 mn 23 pour la maquette contrôle). La comparaison de l'évolution du temps de résolution des exercices montre que le temps de résolution de l'exercice 1 dans la maquette contrôle est deux fois moins important que dans la maquette RàPC, mais ensuite les temps de résolution sont plus proches. On observe cependant une autre différence pour l'exercice 4 : pour la maquette RàPC, le temps de résolution est identique pour les exercices 3, 4 et 5 tandis que pour la maquette test, le temps de résolution diminue entre les exercices 3 et 4, mais augmente pour l'exercice 5, où il est à nouveau identique au temps de résolution de la maquette RàPC.

L'observation du temps passé par étape n'a de sens que dans la maquette RàPC. Cette variable nous indique qu'en moyenne, sur l'ensemble des exercices, les étapes de reformulation et de remémoration sont réalisées en un temps trois fois moins important que les étapes de mémorisation et d'adaptation.

L'évolution du temps consacré à chaque étape au fil des exercices montre une diminution pour toutes les étapes entre les exercices 1 et 4 (figure 5). Cette diminution est plus importante entre les exercices 1 et 3 pour les étapes de mémorisation et d'adaptation que pour les étapes de reformulation et remémoration. Pour l'exercice 5, le temps passé sur les étapes de mémorisation et d'adaptation est constant par rapport à l'exercice 4, tandis que le temps passé pour les étapes de reformulation et de remémoration est supérieur par rapport à celui de l'exercice 4. Les temps de toutes les étapes augmentent à nouveau pour l'exercice 7.

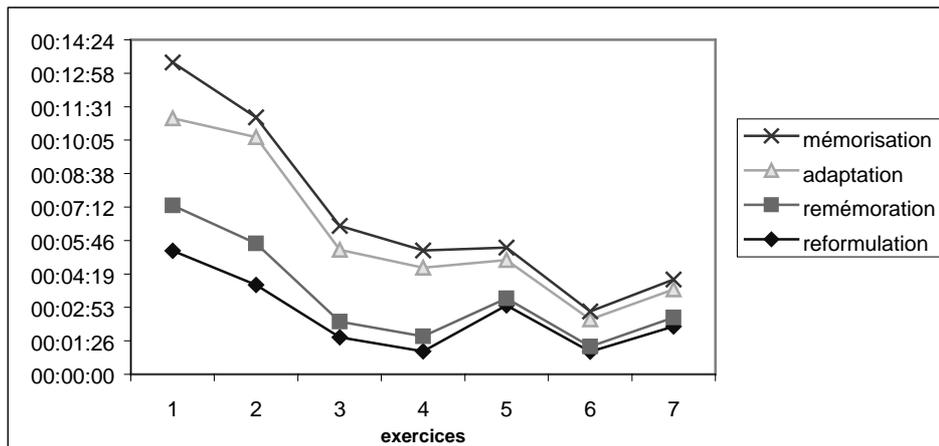


Figure 6 : Evolution du temps par étape au cours de l'utilisation de la maquette

L'observation des messages d'erreur, toute étape confondue, montre que le majorité des messages apparaît dans les étapes de remémoration (moyenne : 0.62), puis d'adaptation (moyenne : 0.48). Les moyennes pour chaque message d'erreur montrent que les erreurs les plus fréquentes sont la remémoration d'un exercice source non approprié (moyenne : 0.62), puis les erreurs sur le nombre de contraintes (moyenne : 0.58), et enfin la proposition d'un plan de résolution incorrect (moyenne : 0.57). Lorsque le plan de résolution est incorrect, les apprenants demandent beaucoup plus souvent à voir la solution (moyenne : 0.55), que de réessayer une nouvelle fois de proposer un plan de résolution (moyenne : 0.33).

L'analyse des messages d'erreur par exercice permet d'observer l'évolution de l'utilisation du logiciel. Dans l'étape d'élaboration (figure 6), beaucoup d'erreurs sont faites sur le choix *avec/sans remise* lors du premier exercice mais plus du tout ensuite. Les erreurs sur le choix *liste ou ensemble* diminuent rapidement entre les exercices 1 et 2, puis plus lentement jusqu'à l'exercice 5. Les erreurs sur le nombre de contraintes sont très importantes pour les deux premiers exercices, puis chutent à partir du troisième exercice et enfin les erreurs de contraintes apparaissent en grand nombre dans l'exercice 4.

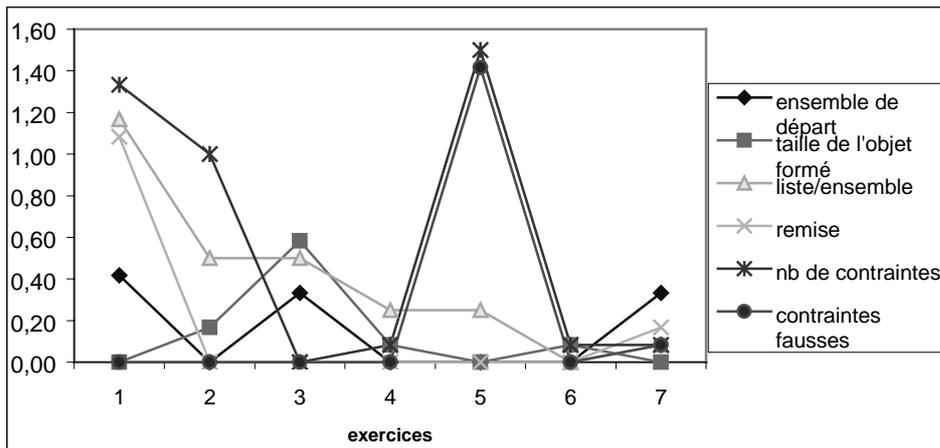


Figure 7 : Étape d'élaboration : évolution des différents types d'erreurs au cours de l'utilisation

Lors de l'étape de remémoration, un seul message d'erreur est renvoyé et indique si l'exercice remémoré est pertinent. La fréquence d'apparition de ce message est irrégulière et dépend donc beaucoup de l'exercice (figure 7). Son apparition est très élevée pour l'exercice 2. Elle est moyenne pour les exercices 1, 3, 5 et 7 et elle est basse pour l'exercice 6.

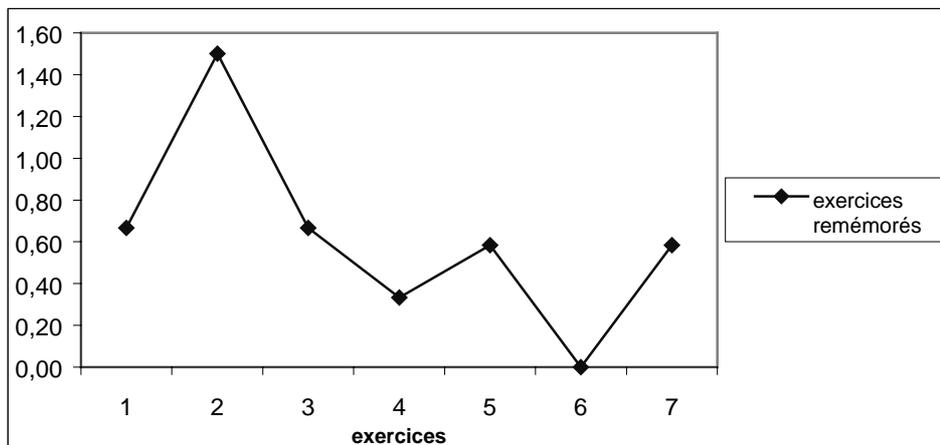


Figure 8 : étape de remémoration : fréquence du message d'erreur par exercice

Lors de l'étape d'adaptation, un feedback indique si le plan de résolution est incorrect. L'apprenant peut alors choisir de voir la solution ou de réessayer de construire nouveau un plan. Ces actions sont également enregistrées. L'analyse de ces traces (figure 8) permet de faire plusieurs observations. La fréquence des erreurs de plan de résolution montre que l'exercice 1 est assez bien résolu contrairement aux exercices suivants (2, 3 et 4). Les derniers exercices sont bien résolus mais seulement par une minorité de participants.

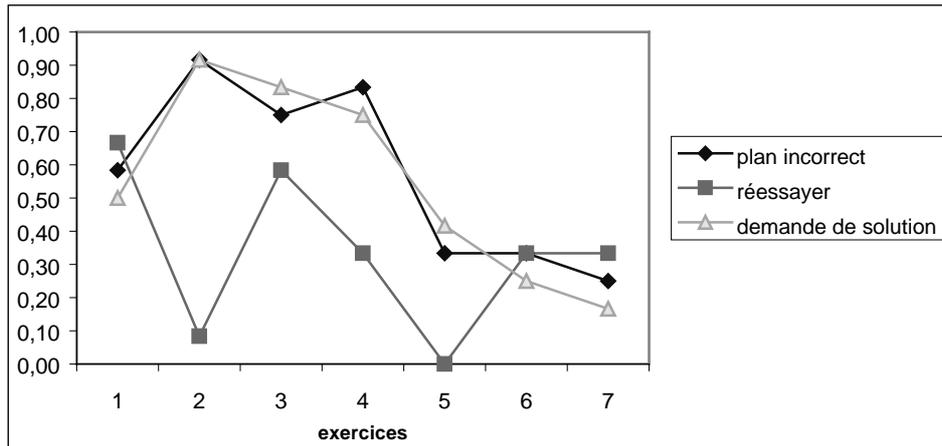


Figure 9 : Étape d'adaptation : fréquence des erreurs par exercice

La demande de solution évolue en parallèle avec le nombre de plans incorrects. L'utilisation du bouton réessayer est important pour les exercices 1 et 3 mais quasiment nulle pour les exercices 2 et 5.

L'étape de mémorisation est la seule qui ne fasse pas l'objet d'un feedback. Cela permet d'observer la classification faite par les apprenants. L'apprenant choisit plus souvent d'associer le problème cible à un problème type plutôt que de l'ajouter à la liste des problèmes types. Ces associations plus souvent effectuées pour les quatre premiers exercices. L'évaluation de ces associations montre qu'elles sont faites selon les traits de structures pour le premier exercice mais pas pour les suivants. Les associations faites pour les exercices 5, 6 et 7 sont à nouveau correctes.

6. DISCUSSION

Les résultats présentés ci-dessus nous permettent maintenant de discuter nos hypothèses. Nous allons donc analyser les résultats de la tâche de résolution d'exercices pour évaluer l'impact de cette maquette sur les performances des apprenants. Puis nous analyserons les similarités utilisées dans la tâche de résolution de problèmes pour évaluer l'induction de catégories de problèmes par la maquette RàPC. Les résultats obtenus à partir de l'analyse des traces nous permettront d'enrichir l'interprétation de ces différents résultats. Enfin, à partir des résultats de l'évaluation de cette maquette, nous ferons quelques propositions pour améliorer l'EIAH AMBRE.

6.1. Evolution des performances

Les différentes analyses de variance réalisées sur les résultats de la tâche de résolution d'exercices, dans le prétest et dans le posttest ont montré des résultats contrastés.

6.1.1. Des résultats contrastés

L'une de nos hypothèses inférait d'une part que les performances pour le posttest soient plus élevées que lors du prétest et d'autre part que l'utilisation de l'EIAH (la maquette RàPC) offre des résultats significativement meilleurs que la simple résolution répétée de problèmes dans un environnement informatique. Or, on n'observe pas d'évolution globale des performances entre le prétest et le posttest sur l'ensemble des exercices mais seulement sur l'exercice 2, considéré comme plus difficile. De plus, si cette différence entre tests pour cet exercice n'est significative que pour la condition RàPC, elle ne permet pas de conclure formellement à une supériorité de la maquette RàPC sur la maquette contrôle pour l'évolution des performances. En effet, la comparaison des résultats des deux conditions lors du posttest n'indique aucune différence significative.

La maquette RàPC joue donc bien un rôle sur l'amélioration des performances, mais pas pour tous les problèmes. Par ailleurs, on ne peut pas affirmer que l'amélioration vient spécifiquement de l'utilisation du principe du RàPC.

Il peut être intéressant de rechercher les raisons de l'amélioration des performances seulement pour l'un des deux exercices proposés. Après avoir examiné le rôle du choix des exercices proposés dans cette tâche, nous rechercherons plus spécifiquement quel peut être le rôle de la maquette sur ce résultat.

6.1.2. Évaluation de la tâche proposée

Le choix des exercices de la tâche de résolution de problèmes a été fait de manière d'une part à ce que les exercices 1 du prétest et du posttest soient proches et faciles, et d'autre part à ce que les exercices 2 soient également proches mais difficiles. Concrètement, les exercices 1 appartiennent tous deux à la classe *liste*, l'un *avec remise*, l'autre *sans remise* et n'ont pas de contrainte, tandis que les exercices 2 appartiennent à la classe *ensemble*, ont pour trait de surface *cartes* et possèdent chacun une contrainte. On peut également noter que la formulation de l'exercice 1 du posttest est plus concise, les traits de surface sont moins explicites ce qui peut augmenter la difficulté de la tâche pour l'apprenant.

Les exercices 2 semblent donc être plus proches entre-eux que les exercices 1, la comparaison entre exercices 1 semble donc être plus délicate.

6.1.3. Importance de l'ordre de présentation des exercices dans la maquette

La maquette a également pu avoir une influence sur l'amélioration des performances pour l'exercice 2 plus que pour l'exercice 1. Comme l'amélioration des performances pour l'exercice 1 est non significative quelque soit la condition, on peut penser que c'est l'ordre et le choix des exercices proposés dans les maquettes qui sont impliqués dans ce résultat plus que l'utilisation du paradigme du RàPC.

L'observation de l'ordre des exercices montre que les exercices de la classe de l'exercice 1 proposés dans la maquette sont en position 1 et 7. Le temps de réalisation est plus important pour l'exercice 1 que pour les autres exercices en raison du temps de prise en main du logiciel par l'apprenant. Aussi, on peut supposer que l'apprenant accorde une attention plus grande à la prise en main du logiciel qu'à cet exercice lui-même. Par ailleurs, seule une minorité d'apprenants (inférieure à 30%) a atteint l'exercice 7. On peut donc interpréter l'absence d'augmentation de performances pour l'exercice 1 par une sous-représentativité dans la maquette de la classe de problème à laquelle il appartient.

6.2. Catégorisation des problèmes

L'analyse des classes de problèmes suivant les conditions et suivant les tests montrent des résultats un peu différents des hypothèses proposées.

6.2.1. Des résultats difficiles à interpréter

Ces résultats montrent d'abord que lors du prétest, les apprenant font des regroupements caractérisés par des trait de surface (*cartes*), mais aussi par des traits de structure (les classes de problème *liste avec remise* et *liste sans remise*). Or nous avons émis

l'hypothèse que lors du prétest les classes de problèmes seraient plutôt formées selon les traits de surface. Cette présence de regroupements suivant les traits de structures peut s'expliquer par les connaissances sur le domaine acquises par les apprenants avant la passation du test. Mais de ce fait, la comparaison des regroupements entre prétest et posttest est plus difficile à interpréter.

Lors du posttest, dans la condition contrôle comme dans la condition RàPC, les regroupements sont également formés suivant les traits de surface (*groupes d'élèves*) et les traits de structure. Cependant les traits pertinents pour les regroupements ne sont pas toujours les mêmes suivant les conditions (*liste sans remise* pour la condition contrôle et *liste avec remise* pour la condition RàPC) et les regroupements sont beaucoup plus accentués dans la condition RàPC. Une analyse plus fine de cette condition fait apparaître deux sous-groupes de participants pour lesquels les classes de problèmes formées sont très différentes. Dans l'un des sous-groupes, la seule classe de problèmes définissable est caractérisée par le trait de surface *groupes d'élèves*, tandis que dans l'autre sous-groupe, on voit apparaître deux classes de problèmes caractérisées par leurs traits de structure (*liste avec remise, ensemble*) et deux regroupements caractérisés par leurs traits de surface (*groupes d'élèves* et *cartes*). La maquette RàPC semble donc accentuer la caractérisation de certaines classes de problèmes pour une partie des participants mais aussi perturber la classification pour d'autres participants. À titre indicatif, les participants du sous-groupe 1 semblent avoir des résultats à l'exercice 2 meilleurs que ceux du sous-groupe 2.

Dans le posttest, un exercice correspondant à la classe *spectre* et le trait de surface *groupes d'élèves* ont été introduits, d'une part pour évaluer la capacité des apprenants à différencier les différentes classes de problèmes, et d'autre part pour évaluer leur capacité à transférer les caractéristiques apprises dans la maquette vers des problèmes ayant d'autres traits de surface. Les résultats montrent que la différenciation de la classe *spectre* n'est pas faite par les apprenants, surtout avec la maquette RàPC (présence d'un groupe *cartes*). Ils montrent également que les apprenants regroupent ensemble les exercices de trait de surface *groupes d'élèves*, et n'utilisent donc pas leurs traits de structure quelle que soit la maquette utilisée. Les classes de problèmes discernées par les apprenants sont donc restreintes aux classes et aux traits de surface déjà rencontrés dans la maquette.

Toutefois ces analyses sont à relativiser : le faible nombre d'exercices à catégoriser et le grand nombre de variables (cinq traits de surfaces, quatre traits de structures) ne permettent pas de tirer des conclusions robustes.

Ainsi, l'ensemble de ces résultats montre que l'utilisation de la maquette RàPC peut induire une classification des problèmes plutôt selon les traits de structures, mais seulement pour les traits de surface utilisés dans la maquette, et uniquement pour une partie des apprenants. Elle a plutôt tendance à déstabiliser les classes de problèmes déjà pressenties chez les autres apprenants.

6.2.2. Difficulté à déterminer les traits structuraux

Pour aller plus loin dans l'analyse, il est nécessaire de comprendre ce qui, dans la maquette, peut avoir gêné la progression. Certains apprenants ont une difficulté à déterminer les traits structuraux, même avec l'aide du raisonnement à partir d'exemple. L'analyse des verbalisations correspondant aux regroupements de problèmes et des traces d'utilisation des maquettes peut apporter des indications sur les causes de cette difficulté.

D'abord, les verbalisations montrent que les symboles (combinaison, arrangement, permutation) utilisés dans l'équation de résolution sont utilisés pour dénommer les regroupements. Si on analyse à nouveau les arbres en prenant en compte ce critère, on se rend compte que, dans la condition contrôle, pour le posttest, un vaste groupe d'exercices peut être caractérisé par l'utilisation de combinaisons dans leur équation de résolution. Les apprenants ont donc des difficultés à différencier plan de résolution et équation de résolution.

L'analyse des verbalisations pour la condition RàPC, dans le posttest, montre également la présence d'allusions aux contraintes. L'insistance sur la reformulation des contraintes dans l'étape d'élaboration pourrait donc peut-être avoir interféré sur l'assimilation des traits structuraux.

Les verbalisations des participants permettent donc de supposer que la difficulté à identifier les traits de structure peut venir d'une part de la difficulté des apprenants à distinguer les caractéristiques importantes pour le plan de résolution de celles importantes pour l'équation de résolution, et d'autre part de l'influence négative des contraintes.

L'analyse des traces d'utilisation peut aussi nous donner des informations sur la façon dont les traits de surfaces sont appréhendés, en observant les étapes d'élaboration, de remémoration et de mémorisation.

L'analyse des erreurs montre que, dans l'étape d'élaboration, les caractéristiques pertinentes pour la résolution semblent identifiées rapidement par les apprenants. En effet, il y a beaucoup d'erreurs pour la caractéristique *remise* lors du premier exercice, mais dès le second exercice on n'observe plus d'erreurs. Pour déterminer si l'objet à former est une liste ou un ensemble, le taux d'erreurs est également important pour le premier exercice, puis

diminue progressivement jusqu'à être très faible à partir du quatrième exercice. L'analyse des erreurs pour l'étape de remémoration montre une évolution tout à fait différente. Le taux d'erreur évolue en dents de scie au cours des différents exercices. Il est moyen pour les exercices 1, 3, 5 et 7, et devient très fort pour le deuxième exercice ; celui-ci a les mêmes traits de surface que deux des exercices types mais a les mêmes traits de structure que le troisième. Le taux d'erreur est donc très dépendant de l'exercice. De même, l'analyse des exercices types choisis lors de l'étape de mémorisation montre qu'il y a beaucoup d'erreurs dans les associations faites. La détermination des caractéristiques demandées est donc bien assimilée, mais il semble beaucoup plus difficile de remémorer la source et de mémoriser selon les critères pertinents.

Ces différents résultats montrent un paradoxe entre la facilité avec laquelle l'étape de reformulation est réalisée et la difficulté à choisir le problème source et mémoriser le problème cible.

Les résultats de certaines études sur l'analogie peuvent expliquer ce paradoxe : dans les expériences de Cummins (Cummins, 1992) les participants doivent répondre à des questionnaires qui leur demandent soit de déterminer toutes les caractéristiques du problème soit de faire des liens entre les deux problèmes présentés. Les participants qui ne font que reformuler deux problèmes successifs ont des résultats moins bons pour l'induction de catégories que les participants qui se contentent de lire les problèmes. À l'inverse, des sujets qui ne font que comparer des problèmes ont par la suite des résultats meilleurs pour l'induction de catégorie.

On peut donc suggérer que la maquette, même si elle demande de choisir un problème source, ne suggère pas assez fortement l'utilisation de l'analogie et n'encadre pas assez l'étape de remémoration par rapport à l'étape de reformulation.

Enfin, l'évolution du temps passé sur les différentes étapes montre que les étapes d'élaboration et de remémoration prennent peu de temps alors que l'étape de mémorisation est plus longue à réaliser. On peut en déduire que les étapes de reformulation et de remémoration se font de façon automatique. En corrélant le temps par exercice et le taux d'erreurs de la remémoration, on se rend compte que la remémoration n'est pas une étape facile et bien assimilée. On peut supposer que les apprenants procèdent par essai-erreur. Le temps passé sur l'étape de mémorisation est plus long car cette étape est inhabituelle ; c'est aussi l'étape la moins aboutie ergonomiquement. C'est l'étape la plus perturbante.

Ces différentes interprétations nous montrent d'abord que, même si l'étape de reformulation permet d'explicitier les traits de structure, cela ne facilite pas l'utilisation de ces

traits dans l'étape de remémoration ; l'accent n'est sans doute pas assez porté sur cette étape là. De plus, les analyses montrent que certaines étapes peuvent être réalisées de façon automatique ce qui ne permet pas de développer les compétences désirées.

Plus que l'influence négative de la description des contraintes dans l'étape de reformulation, la réalisation des différentes étapes de façon automatique peut expliquer à la fois la difficulté à déterminer les traits de structure et la faible influence de l'utilisation du paradigme de RàPC sur l'amélioration des performances dans une tâche papier-crayon.

6.3. Évolution future de l'EIAH

Ces différents résultats nous amènent à repenser certaines caractéristiques de l'EIAH AMBRE.

6.3.1. Critique de la maquette

Le fait que l'apprenant puisse utiliser la tactique essai-erreur pour passer à une autre étape, de même qu'il préfère demander directement la solution plutôt que de réessayer, met en évidence l'une des limites de cette maquette. Le degré d'initiative de l'apprenant est très faible et le nombre de réponses acceptées par le système est très réduit, ce qui en fait un système trop rigide. Ce type d'accompagnement directif est l'objet de critiques bien connues (Balacheff, 1994). Dans ce cadre, l'apprenant n'a pas l'occasion d'exprimer sa propre compréhension. Il se contente souvent d'optimiser ses stratégies, l'apprentissage étant alors réduit à une forme de conditionnement sans que les réactions de l'apprenant ne se rapportent à la connaissance mise en jeu.

Mais cette situation vient du fait qu'il s'agit d'une maquette simplifiée. L'intégration d'un système d'intelligence artificielle pourra permettre de rendre l'interaction plus souple.

6.3.2. Conseils pour la conception

Dans la réalisation future du projet AMBRE, l'intégration d'un système IA pourra permettre offrir une plus grande liberté à l'apprenant et des explications plus adaptées. L'ergonomie des interfaces (et de l'étape de mémorisation en particulier) seront revues et améliorées.

Sur le plan de l'utilisation du paradigme de RàPC, les résultats de cette expérience mettent en évidence la nécessité de certaines améliorations.

L'étape de remémoration semble en particulier être la plus importante à développer. Il faudra aussi réfléchir à une façon d'inciter plus fortement à la comparaison entre les problèmes. De plus, des outils pour faciliter cette comparaison doivent être proposés à

l'apprenant ; un outil permettant de mettre en évidence les similitudes (en vert) et les différences (en rouge) a déjà été suggéré.

Par ailleurs, la circulation entre les étapes doit être rendue possible pour que l'apprenant puisse se rendre compte par lui-même de l'influence du choix du problème source sur la suite de la résolution (l'étape d'adaptation), et pour qu'il lui soit possible de faire le rapprochement entre l'étape de remémoration et de mémorisation.

On voit donc que l'utilisation du paradigme de RàPC pour guider la résolution de problèmes peut être intéressant mais qu'il nécessite quelques arrangements.

7. CONCLUSION

Pour cette étude, nous avons conçu et réalisé une maquette de l'EIAH AMBRE utilisant le paradigme de RàPC pour faciliter l'apprentissage de méthodes en guidant l'élève pour la classification des problèmes et des outils de résolution. Afin d'évaluer l'impact de ce paradigme sur la classification des problèmes et des outils, nous avons mis en place une expérience proposant une tâche de catégorisation de problèmes ainsi qu'une tâche de résolution d'exercices.

Bien que les résultats obtenus ne permettent pas de confirmer nos hypothèses, ils nous permettent cependant, de mieux comprendre le comportement et les conceptions de l'apprenant, ce qui nous amène à envisager de nouvelles expérimentations. Par ailleurs, ces résultats nous conduisent à la proposition de recommandations qui devraient faciliter, dans l'EIAH AMBRE, la classification par l'apprenant des problèmes et des outils de résolution.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Aleven, V. & Ashley, K.D. (1997). Teaching Cased-Based argumentation through a model and exemples – Empirical evaluation of an intelligent learning environment. *Artificial Intelligence in Education*. 87-94.
- Artigue, M. (1995). Une approche didactique de l'intégration des EIAO à l'enseignement. in D. Guin, J.-F. Nicaud et D. Py (eds), EIAO, 2, 17-28, Eyrolles.
- Balacheff, N. (1994). Didactique et intelligence artificielle. *Recherches en didactique des mathématiques*, 14, 12, 9-42.
- Baron, G.-L., Blanchet, A. Bruillard, E., Depover, C., Harrari, M. Luc-Olivier Pochon and Strebelle, A. (1997). L'ordinateur à l'école : de l'introduction à l'intégration. In Pochon et Blanchet (eds.), INDP, Neuchâtel.
- Barthélemy, J.P. and A. Guénoche (1991). Trees and Proximity Representations, J. Wiley, London, 238.
- Bastien, C. & Scapin, D. (1993). Critères ergonomiques pour l'évaluation des interfaces utilisateurs. RT n°156, INRIA.
- Burke, R. and Kass, A. (1996). Retrieving stories for Cased-Based Teaching. In leake, D. (ed.), *Cased Based Reasoning : Experiences, Lessons, and future directions* (pp.93-110), Menlo Park : AAAI Press/MIT Press.
- Cauzinille-Marmèche, E. and Mathieu, J. (1988). Adapter les interventions tutorielles au modèle cognitif de l'étudiant. In Caverni J.-P. (ed.), *Psychologie cognitive, modèles et méthodes* (pp.175-190), P.U.G..
- Chi, M., Feltovich, P. & Glaser, R. (1981). Caregorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive science*, 5,121-152.
- Cummins,D.D.(1992). Role of analogical reasoning in the induction of problems categories. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 5, 1103-1124.
- Delozanne, E. (1993). Explication en EIAO: étude à partir d'ELISE un logiciel pour s'entraîner à une méthode de calcul de primitives. *Thèse de doctorat*, Université du maine, Le Mans.
- Gentner, D. (1988). Metaphor as structure mapping : the relation shift. *Child developement*, 59, 47-59.
- Gentner, D. (1989). The mechanisms of analogical learning, In S. Vosnadiou and A. Ortony (eds.), *Similarity and analogical reasoning*, (pp.199-241). Cambridge : Cambridge University Press.
- Gilbert, J.E. (2000). Cased Based reasoning applied to instruction method selection for intelligent tutoring systems. *Work-shop 5 : Cased based reasoning in intelligent training systems. ITS'2000*. Montreal, 11-15.
- Guin, N. (1998). Système d'aide à la décision et à la formation : reformuler et classer un problème pour le résoudre. le système SYRCLAD et son application à quatre domaines. *Thèse de doctorat à l'université Paris 6*.
- Guin-Duclosson, N., Jean-Daubias, S., Nogry, S. (2001). Le projet AMBRE : utiliser le RàPC pour enseigner des méthodes. *RàPC'2001*, Grenoble.
- Heraud, J.M. (2000). Projet d'intégration de l'expérience pour l'enseignement à distance : présentation du prototype. *RàPC'2000*. Toulouse, 33-37.
- Holyoak, K.J. (1985). The pragmatics of analogical transfer. In G.H. Bower (ed.), *The psychology of learning and motivation*, Vol 19, (pp. 59-87). New York : Academic Press.
- Holyoak, K.J. & Thagard, P. (1989). Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive science*, 13, 295-355.
- Jean S. (2000). PEPITE : un système d'assistance au diagnostic de compétences. *Thèse de doctorat*, Université du maine, Le Mans.
- Le calvez, F. , Urtasun, M., Giroire, H., Tisseau, G., Dumas, J. (1997). Les machines à construire, des modèles d'interaction pour apprendre une méthode constructive de dénombrement. EIAO'97, acte des cinquièmes journées de Cachan (Baron M., Mendelhsen P., Nicaud, J.F. eds.), Hemès, 49-60.
- Melot, A.M. (1991). Contrôle des conduites de mémorisation et métacognition. *Bulletin de psychologie*, 339, 138-146.
- Perrière, G. and Gouy, M. (1996). WWW-Query: An on-line retrieval system for biological sequence banks. *Biochimie*, 78, 364-369.

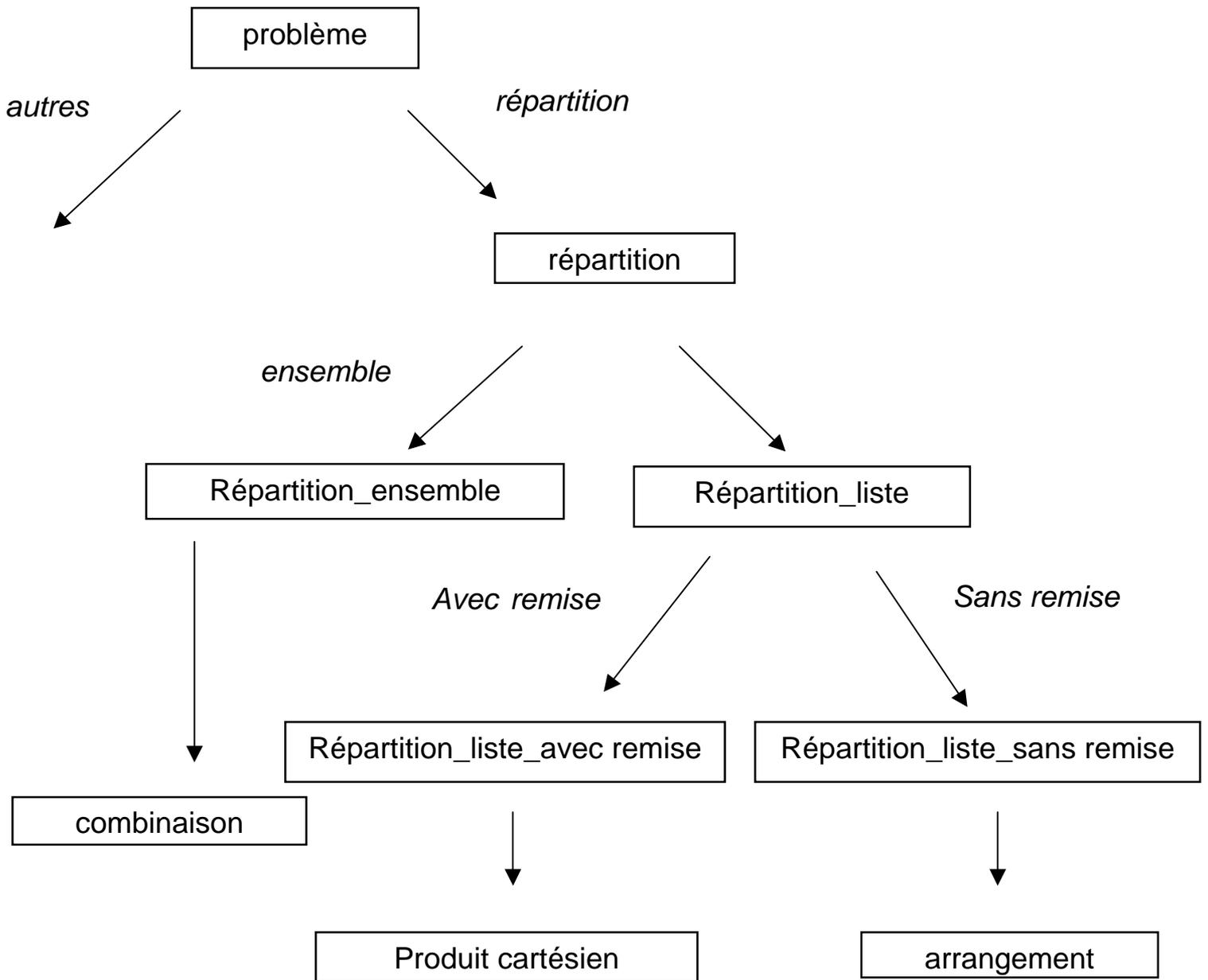
- Ross, B.H. (1989). Distinguishing types of superficial similarities : different effect on the access and use of earlier problems. *Journal of Experimental Psychology : learning, memory and cognition*, 15, 456-468.
- Ross, B.H. & Bradshaw, G.L. (1994). Encoding effects of reminders, *Memory & cognition*, 22, 591-605.
- Ross, B.H. and 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*, 2, 427-444.
- Rogalski, M. (1993). Les concepts de l'EIAO sont-ils indépendants du domaine ? L'exemple de l'enseignement de méthode en analyse. In Baron, M. and ROBERT, A. (eds.), *Métaconnaissances en IA, en EIAO et en didactique des mathématiques*, pp.89-110. LAFORIA 93/18.
- 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.
- Sander, E. (2000). L'analogie, du naïf au créatif. Paris, l'Harmattan.
- Schank,, R. & Edelson D. (1990). A role for AI in education : using technology to reshape education. *Journal of artificial intelligence education*, 1.2, 3-20.
- Senach, B. (1990). Evaluation ergonomique des interfaces homme machine : une revue de la littérature. RT n°1180, INRIA.
- Shiri A., Aimeur, E. & Frasson C. (1998). A Cased Based student modelling system. Fourth european workshop on Cased Based Reasoning, Dublin. *Lecture notes in artificial intelligence*, 1488, 425-436.
- VanLehn, K. (1996). Cognitive Skill Acquisition. In Spence, J. et Foss, D.J. (Eds.), *Annual Review of Psychology* (Vol. 42, pp. 513-539). Palo Alto, CA.
- VanLehn, K. (1998). Analogy Events : How Examples are Used During Problem Solving. *Cognitive Science*, 22 (3), 347-388.
- VanLehn, K., & Jones, R.M. (1993). Better Learners Use Analogical Problem Solving Sparingly. In *Machine Learning : Proceedings of the 10th International Conference*, 338-345. San Mateo, Ca : Morgan Kaufmann.

Notes bibliographiques :

- Barsalou L.W. & Médine, D.L. (1986). Concepts : static definitions or context dependant representation ? *Cahiers de psychologie cognitive*, 6, 187-202.
- Clancey, W.J. (1983). The epistemology of a rule based expert system : A framework for explanation. *Artificial Intelligence*, 20, 215-251.
- Collins, A.M. & Quillian, M.R. (1969). Retrieval time from semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour*, 8, 240-248.
- Piaget, J. (1975). *L'équilibration des structures cognitives*, P.U.F. (ed.).
- Rosch, E. & Mervis, C.B. (1975). Family resemblances : studies in the internal structure of categories. *Cognitive Psychology*, 7, 573-605.
- Schank, R.C. (1982). *Dynamic memory : A theory of reminding and learning in computers and people*. Cambridge : Cambridge University.

Annexe 1 :

Hierarchie de classes de problèmes de dénombrement



ANNEXE 2 :
Enoncés des tâches de catégorisation et de résolution d'exercices

Regroupez les énoncés d'exercices (sans les résoudre) suivant la similarité de leur résolution:
des exercices qui se résolvent de la même manière vont dans le même groupe
Vous n'êtes limités ni dans le nombre de groupe que vous pouvez faire, ni dans le nombre d'énoncés qui peuvent appartenir à un groupe

Pour chaque groupe que vous avez formés, expliquez en quoi les exercices sont similaires.

Nous vous demandons de résoudre les 2 exercices proposés sur cette feuille sans limite de temps.
(notez le plan de résolution et l'équation, pas la solution numérique)
A titre indicatif, veuillez noter l'heure de début de fin de la résolution pour chaque exercice.

Annexe 3 :
exemples d'exercices appartenant aux trois classes de problèmes de la classe répartition

Exercice de la classe *liste avec remise* :

Combien de nombres distincts de 4 chiffres peut-on former en n'utilisant que 2, 4, 5, 6, 8 et 9?

Exercice de la classe *liste sans remise* :

Un enfant forme des nombres sans répétition avec des chiffres de 1 à 7.

Combien peut-il former de nombres de 3 chiffres contenant exactement un 5 ?

Exercice de la classe *ensemble* :

On dispose d'un jeu de 32 cartes. On en tire 3 simultanément.

Quel est le nombre de tirages de 3 cartes qui comportent exactement 2 coeurs ?

Annexe 4 :
Traits de surfaces et classes des problèmes à classer

exercices	prétest		posttest	
	traits de surface	traits de structure	traits de surface	traits de structure
1	chiffre	liste avec remise	chiffre	liste sans remise
2	chiffre	liste sans remise	chiffre	liste avec remise
3	dé	liste avec remise	groupe	liste sans remise
4	dé	liste sans remise	groupe	ensemble
5	jeton	liste avec remise	jeton	ensemble
6	jeton	ensemble	jeton	liste avec remise
7	lettres	liste avec remise	lettres	liste sans remise
8	lettres	liste sans remise	lettres	liste avec remise
9	cartes	ensemble	cartes	spectre
10	cartes	autre catégorie	cartes	ensemble

Annexe 5 :
Écrans de la maquette RàPC

Étape d'élaboration :



Etape de remémoration :

The screenshot shows a software window titled "Problème" with a menu bar "Fichier Options". A navigation bar at the top contains buttons for "Problème", "Reformulation", "Remémoration d'un problème type" (which is highlighted), "Adaptation de la résolution du pb type", and "Mémorisation du nouveau problème".

The main content area is divided into several sections:

- Énoncé du problème:** "Combien de nombres distincts de 4 chiffres peut-on former en n'utilisant que 2, 4, 5, 6, 8 et 9 ?"
- Reformulation du problème:** "A partir d'un ensemble de 6 chiffres : chiffres donnés : 2,4,5,6,8,9 on forme une liste de 4 éléments tirés avec remise"
- Choisissez parmi les reformulations suivantes celle qui est la plus proche du problème:** A list of reformulations with a scrollable selection box. The first option is "Pas de reformulation appropriée". Other options include: "A partir de l'ensemble des 26 lettres de l'alphabet on forme une liste avec remise de 6 éléments.", "A partir de l'ensemble des 26 lettres de l'alphabet on forme une liste sans remise de 6 éléments dont 2 éléments vérifient 'type de lettre est voyelle'.", and "A partir d'un ensemble de 32 cartes, on forme un ensemble de 3 éléments dont 1 élément vérifie 'hauteur est valet'."
- Énoncé du problème type:** "On place 26 cartons dans une urne, chacun portant une lettre de l'alphabet. On forme des mots de 6 lettres en tirant successivement six cartons avec remise dans l'urne après chaque tirage. Combien de mots différents peut-on former ?"
- Reformulation du problème type:** "A partir de l'ensemble des 26 lettres de l'alphabet, on forme une liste avec remise de 6 éléments."
- Plan de résolution du problème type:** "On remplit les 6 places en choisissant 6 éléments parmi les 26 éléments disponibles."

At the bottom right, there are buttons for "solution du problème type" and "autres problèmes de ce type".

Etape d'adaptation :

The screenshot shows the same software window, but now the "Adaptation de la résolution du pb type" button is highlighted in the navigation bar.

The main content area is a grid of adaptation options:

- Énoncé du problème type:** "On place 26 cartons dans une urne, chacun portant une lettre de l'alphabet. On forme des mots de 6 lettres en tirant successivement six cartons avec remise dans l'urne après chaque tirage. Combien de mots différents peut-on former ?"
- Énoncé du problème:** "Combien de nombres distincts de 4 chiffres peut-on former en n'utilisant que 2, 4, 5, 6, 8 et 9 ?"
- Reformulation du problème type:** "A partir de l'ensemble des 26 lettres de l'alphabet, on forme une liste avec remise de 6 éléments."
- Reformulation du problème:** "A partir d'un ensemble de 6 chiffres : chiffres donnés : 2,4,5,6,8,9 on forme une liste de 4 éléments tirés avec remise"
- Plan de résolution du problème type:** "On remplit les 6 places en choisissant 6 éléments parmi les 26 éléments disponibles."
- Plan de résolution du problème:** A large empty box for writing a solution plan.
- solution du problème (left):** "26*6"
- solution du problème (right):** A large empty box for writing the final solution.

On the right side, there is a vertical list of adaptation templates:

- on choisit x ... parmi y
- on choisit un... parmi x pour chacune des positions y
- on choisit x places parmi y pour les...
- on choisit un... parmi x pour chacune de ces places
- on choisit un... parmi x pour chacune de ces places, toutes différentes
- on choisit x éléments parmi y éléments disponibles
- on complète en choisissant x éléments parmi les y éléments restants
- on complète en choisissant x éléments parmi les y éléments de l'ensemble de départ
- on complète les x places restantes en choisissant x éléments parmi les y éléments restants
- on complète les x places restantes en choisissant x éléments, tous distincts, parmi les y éléments restants
- on remplit x places en choisissant x éléments parmi les y disponibles
- On remplit les x places en choisissant x éléments, tous distincts, parmi les y éléments disponibles

At the bottom right, there is a "tout effacer" button.

Etape de mémorisation :

The screenshot shows a software window titled "Problème" with a menu bar containing "Fichier" and "Options". Below the menu bar is a navigation bar with five buttons: "Problème", "Reformulation", "Remémoration d'un problème type", "Adaptation de la résolution du pb type", and "Mémorisation du nouveau problème". The "Mémorisation du nouveau problème" button is highlighted with a red border. The main content area is divided into several sections:

- Énoncé du problème**: Combien de nombres distincts de 4 chiffres peut-on former en n'utilisant que 2, 4, 5, 6, 8 et 9 ?
- Reformulation du problème**: A partir d'un ensemble de 6 chiffres : 2,4,5,6,8,9 on forme une liste avec remise de 4 éléments.
- Correction du plan de résolution du problème**: On remplit les 4 places en choisissant 4 éléments parmi les 6 éléments disponibles.
- Correction de la solution du problème**: 6^4
- Problèmes types déjà rencontrés**:
 - A partir de l'ensemble des 26 lettres de l'alphabet, on forme une liste avec remise de 6 éléments.
 - A partir de l'ensemble des 26 lettres de l'alphabet, on forme une liste sans remise de 6 éléments dont 2 éléments vérifient "type de lettre est voyelle".
 - A partir d'un ensemble de 32 cartes, on forme un ensemble de 3 éléments dont 1 élément vérifie "hauteur est valet".

Two buttons are located between the reformulation and the types section:

- Associer le nouveau problème à un problème type
- Ajouter le nouveau problème comme nouveau problème type