

Représentation des connaissances dans l'EIAH AMBRE-add

Nathalie Duclosson

LIRIS

Université Claude Bernard - Lyon 1

Nautibus, 8 bd Niels Bohr, Campus de la Doua

69622 Villeurbanne Cedex

Nathalie.Guin-Duclosson@liris.univ-lyon1.fr

Résumé

Dans cet article, nous décrivons comment sont représentées les connaissances dans l'Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain (EIAH) AMBRE-add. Cet EIAH, destiné à l'apprentissage d'une méthode de résolution de problèmes additifs, s'appuie sur des études en didactique des mathématiques et en psychologie cognitive. Il exploite le paradigme du raisonnement à partir de cas pour permettre à l'apprenant de mettre lui-même en évidence des classes de problèmes, en utilisant des problèmes qu'il a déjà rencontrés au cours de l'apprentissage. Nous décrivons comment sont représentées les connaissances du domaine et les connaissances pédagogiques dans cet EIAH, en présentant l'architecture du système à base de connaissances permettant d'assurer des fonctionnalités d'aide, de diagnostic des réponses de l'apprenant et d'explication de ses erreurs.

Abstract

This paper describes how is represented knowledge in the Intelligent Tutoring System (ITS) AMBRE-add. This ITS intend to teach methods and is based on didactical studies and cognitive psychology studies. The Case-Based Reasoning paradigm is used to help the learner to find himself problems classes, using problems he or she has already seen during the learning. We describe how is represented domain knowledge and pedagogic knowledge in this ITS, presenting the architecture of a knowledge based system that enable to give help to the learner, to diagnose his or her answers and to explain his or her mistakes.

Mots clés : EIAH, représentation des connaissances, enseignement de méthodes, aide, diagnostic, explications, Raisonnement à Partir de Cas.

Keywords : ITS, knowledge representation, method teaching, help, diagnostic, explanations, Case-Based Reasoning.

Introduction

Le projet AMBRE (Apprentissage de Méthodes Basé sur le Raisonnement à partir de l'Expérience) est un travail pluridisciplinaire (Guin-Duclosson, Jean-Daubias et Nogry 2002) dont le but est de concevoir des environnements d'apprentissage pour l'acquisition de méthodes. Ce projet se fonde sur des recherches en didactique des disciplines sur l'enseignement de méthodes. Nous proposons d'utiliser le cycle du Raisonnement à Partir de Cas (RàPC) pour faire acquérir à l'apprenant des méthodes fondées sur le classement des problèmes et des outils de résolution. Dans le cadre de ce projet, nous avons développé un Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain (EIAH) pour le domaine des problèmes additifs. Cet EIAH est construit autour d'un système à base de connaissances qui permet de diagnostiquer les réponses de l'apprenant et de lui fournir des explications.

Dans la première partie de cet article, nous présentons le projet AMBRE et le principe d'apprentissage que nous essayons de mettre en œuvre dans les EIAH issus de ce projet. Puis nous décrivons le domaine des problèmes additifs et la méthode que nous souhaitons faire acquérir pour ce domaine. Dans une troisième partie, nous présentons l'EIAH AMBRE-add que nous avons développé pour ce domaine des problèmes additifs dans le cadre du projet AMBRE. Dans la quatrième partie de l'article, nous décrivons l'architecture du système à base de connaissances autour duquel est construit AMBRE-add et comment ce système construit des messages d'aide, diagnostique les réponses de l'élève et lui donne des explications sur ses erreurs.

Le Projet AMBRE

L'objectif du projet AMBRE est la conception d'EIAH permettant à l'apprenant d'acquérir des méthodes. Les méthodes que nous envisageons d'enseigner s'appuient sur des études en didactique des disciplines. Le principe proposé par le projet AMBRE est d'utiliser le paradigme du RàPC afin d'aider l'apprenant à acquérir une méthode, en utilisant des problèmes qu'il a déjà rencontrés au cours de l'apprentissage.

Nous présentons dans cette partie en quoi consistent les méthodes que nous souhaitons enseigner, puis nous rappelons le principe du RàPC. Enfin nous décrivons

comment nous utilisons ce paradigme dans le cadre du projet AMBRE.

L'Enseignement de Méthodes

Certaines études en didactique des disciplines (Rogalski 1994, Schoenfeld 1985) proposent d'enseigner des méthodes fondées sur une classification des problèmes et des techniques de résolution. Nous nous appuyons sur ces études afin de proposer qu'utiliser une méthode pour résoudre des problèmes d'un domaine donné consiste à identifier la classe du problème à résoudre afin de savoir quelle technique de résolution appliquer pour résoudre ce problème.

Rogalski propose que pour concevoir un tuteur intelligent, on parte des connaissances telles qu'on veut qu'elles fonctionnent chez l'apprenant après l'apprentissage (Rogalski 1994). Il précise que le résolveur d'un "tuteur donneur de leçons de méthodes" doit fonctionner selon les méthodes qu'il veut enseigner, et non pas selon des méthodes expertes du domaine concerné. Le résolveur que nous utilisons dans le projet AMBRE fonctionne justement selon les méthodes que nous souhaitons enseigner. Toutefois, même si l'on dispose d'une méthode explicite et d'un système informatique capable de l'appliquer, on sait qu'il n'est pas forcément souhaitable de présenter explicitement la méthode à l'apprenant. En effet, dans certains domaines, les termes définissant les classes de problèmes et les techniques de résolution ne sont pas utilisés institutionnellement et ne sont pas connus des apprenants. De plus, les recherches sur l'apprentissage nous incitent à envisager une démarche où l'apprenant est actif et se construit sa propre méthode, en représentant une classe de problème par un problème prototypique de cette classe. Nous pensons que le paradigme du raisonnement à partir de cas peut aider l'apprenant dans l'acquisition d'une telle méthode (Cauzinille-Marmèche et Didierjean 1998).

Le Raisonnement à Partir de Cas

Le RàPC (Kolodner 1993) est un paradigme fondé sur la réutilisation d'exemples issus des recherches en intelligence artificielle sur la résolution de problèmes. Ce principe de résolution peut être décrit par un ensemble d'étapes séquentielles (élaboration, mémorisation, adaptation, test/révision, mémorisation) que l'on représente souvent par un cycle (Aamodt et Plaza 1994, Mille 1998) (cf. Figure 1). À partir d'un problème cible, on élabore le cas en utilisant des connaissances générales et en ne gardant que les informations pertinentes. Puis on se remémore un cas proche (le cas source) en cherchant dans la base de cas ; on adapte ensuite la solution du cas source afin d'obtenir une solution au problème cible. On teste cette solution qu'on révisé éventuellement, puis on mémorise le cas cible dans la base de cas pour une réutilisation future.

AMBRE : Guider la Résolution en Suivant le Cycle du RàPC

Dans le projet AMBRE, le cycle du Raisonnement à Partir de Cas est utilisé comme une démarche proposée à l'apprenant pour faciliter sa tâche de résolution de problèmes.

Une séance de travail avec un EIAH AMBRE se divise en deux phases. La première phase est destinée à présenter à l'apprenant des problèmes-type résolus qui serviront de référence par la suite. Après plusieurs séances, l'apprenant aura vu un problème-type correspondant à chaque classe de problèmes définie au sein de la méthode.

La deuxième phase de la séance est consacrée à la résolution par l'apprenant de plusieurs problèmes. L'EIAH guide l'apprenant dans sa résolution à travers cinq étapes inspirées du cycle du RàPC (cf. Figure 2). Après une première étape destinée à la lecture de l'énoncé, l'apprenant doit reformuler le problème en identifiant les éléments de l'énoncé pertinents pour la résolution (étape analogue à l'élaboration du RàPC).

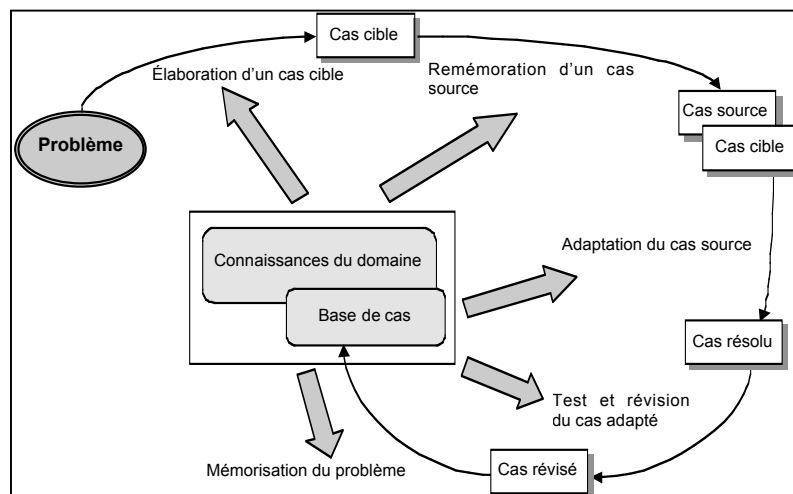


Figure 0. Le cycle du Raisonnement à Partir de Cas

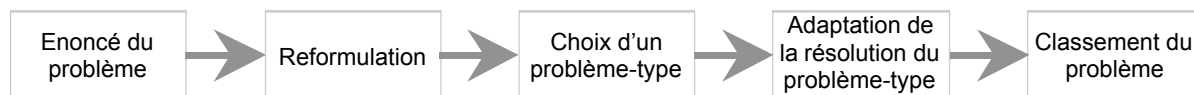


Figure 2. Le cycle AMBRE

Dans une troisième étape, l'apprenant choisit parmi les problèmes-type qui lui ont été présentés celui qui lui semble le plus proche du problème à résoudre (étape analogue à la remémoration). Il identifie ainsi de manière implicite la classe du problème à résoudre. Ensuite, l'apprenant doit rédiger la solution du problème en s'inspirant de la solution du problème-type (étape analogue à l'adaptation). Nous espérons que cette adaptation l'amène par généralisation à identifier une technique de résolution adaptée aux problèmes de cette classe. Enfin, la dernière étape consiste pour l'apprenant à associer le problème qu'il vient de résoudre à un problème-type, de manière à constituer des groupes de problèmes correspondant aux classes, un groupe étant représenté par un problème-type (étape analogue à la mémorisation). L'étape de test et de révision du cycle du RàPC est incluse dans chaque étape du cycle AMBRE. En effet, à chaque étape le système peut tester les réponses de l'élève et l'aider à les réviser.

Sur ce principe, une première maquette d'EIAH a été développée dans le cadre du projet AMBRE, sur le domaine des problèmes de dénombrements au niveau de la terminale scientifique. Cette maquette a fait l'objet d'une expérimentation en classe qui a permis de formuler des recommandations pour la suite du projet AMBRE (Nogry, Jean-Daubias et Guin-Duclosson 2002).

Actuellement, nous appliquons le principe du projet AMBRE au domaine des problèmes additifs proposés à l'école primaire. Nous présentons ce domaine dans la partie suivante, puis nous décrirons l'EIAH AMBRE-add que nous avons développé pour ce domaine en suivant le principe présenté ci-dessus.

Le Domaine des Problèmes Additifs

Le domaine des problèmes additifs est l'un des domaines les plus largement étudiés en didactique des mathématiques, psychologie cognitive, et linguistique (cf. Fayol 1990 pour une synthèse). Les problèmes additifs décrivent une situation concrète, par exemple un jeu de billes : « Alex avait 32 billes. À la fin de la récréation, il en a 45. Combien a-t-il gagné de billes pendant la récréation ? »

Pour un problème de ce type, on attend une résolution en plusieurs étapes :

- Décrire le problème à l'aide d'une "opération à trou" : $32 + ? = 45$
- Écrire comment on effectue le calcul¹ : $45 - 32 = ?$
- Effectuer le calcul : 13
- Écrire la réponse à la question : Alex a gagné 13 billes.

¹ Éventuellement, selon le niveau scolaire

Certains problèmes additifs sont résolus dès la maternelle, alors que d'autres posent encore des difficultés en fin de troisième (Damm 1992). Dans le cadre du projet AMBRE, nous nous intéressons aux problèmes additifs destinés aux élèves d'école primaire. Dans l'EIAH AMBRE-add décrit, nous avons considéré ceux étudiés en CE1-CE2.

Nous présentons maintenant les travaux de didactique des mathématiques sur lesquels nous nous sommes appuyés pour expliciter la méthode que nous souhaitons enseigner.

Études en Didactique des Mathématiques

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

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

Greeno et Riley montrent que les difficultés que rencontrent les jeunes enfants dans la résolution de problèmes additifs viennent essentiellement du fait qu'ils n'arrivent pas à se représenter correctement la situation décrite dans l'énoncé. Ce qui permet à des enfants plus âgés de bien résoudre les problèmes additifs est leur capacité à modéliser les problèmes (Greeno et Riley 1987). Cette difficulté à modéliser les problèmes additifs vient peut-être en partie du fait que les enfants n'ont pas à leur disposition les outils que sont les équations et les entiers relatifs, outils que nous adultes utilisons pour modéliser ces problèmes.

La classification établie par Vergnaud (Vergnaud 1982) précise la classification de Riley, Greeno et Heller. En distinguant le calcul numérique du calcul relationnel, il propose une approche plus opératoire pour modéliser les problèmes additifs. Cependant, lorsque l'on évalue les taux de réussite à ces problèmes, on remarque que la difficulté n'est pas liée à l'opération mathématique sous-jacente. En revanche la catégorie du problème (réunion, changement ou comparaison)

intervient dans la difficulté du problème, ainsi que la nature de l'inconnue.

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

Une Méthode Représentée grâce à des Schémas

La classification que nous avons utilisée s'appuie sur la classification de Guin (Guin 1991). Inspirée des travaux de Vergnaud (Vergnaud 1985), cette classification a pour objectif de permettre aux élèves de reconnaître la situation qui correspond à l'exercice et de la modéliser grâce à des opérateurs. Nous avons repris une partie de cette classification, que nous avons ensuite étendue aux problèmes de comparaison. Cependant, la modélisation en termes d'opérateurs nous est apparue trop difficile pour les élèves de CE1-CE2. C'est pourquoi nous avons préféré choisir une modélisation utilisant des schémas.

En effet, plusieurs études en didactique des mathématiques proposent des schémas pour représenter les problèmes et montrent que l'utilisation de ces schémas peut améliorer les performances de résolution et de catégorisation de problèmes (Damm 1992, Fisher 1979, Fisher 1993, Vergnaud 1982, Willis et Fuson 1988). Pour les catégories "réunion" et "changement", nous avons adapté des schémas existants proposés dans les travaux cités ci-dessus. En ce qui concerne la catégorie "comparaison", nous n'avons pas trouvé de schéma répondant à nos besoins. Un travail de conception au sein d'une équipe pluridisciplinaire nous a amené à formuler plusieurs propositions que nous testons actuellement auprès d'élèves (Jean-Daubias 2004).

La Figure 3 résume en utilisant ces schémas la classification de problèmes que nous utilisons dans la méthode que nous souhaitons faire acquérir avec l'EIAH AMBRE-add. Nous considérons des problèmes de réunion sur les objets de deux personnes, des problèmes de changement sur les objets d'une personne, et des problèmes de comparaison sur les objets de deux personnes. Pour chacune de ces trois catégories de problèmes, la classe du problème dépend de la nature de l'inconnue (représentée sur la Figure 3 par un point d'interrogation), ainsi que de l'opérateur pour les problèmes de changement (l'opérateur inconnu correspond aux problèmes où l'on demande par exemple « Que s'est-il passé pendant la partie ? »).

Dans le projet AMBRE, nous considérons qu'une méthode de résolution de problèmes est constituée d'une classification des problèmes, mais aussi d'une classification des outils de résolution. Nous associons donc à chaque classe dans la Figure 3 une opération à trou (par exemple $a + ? = b$) qu'il faut instancier au problème pour obtenir l'opération à trou représentant le problème (par exemple $32 + ? = 45$). Le reste de la résolution (écrire comment l'on calcule la solution, la calculer et écrire la réponse à la question) mobilise d'autres compétences (relevant du calcul numérique et

non du calcul relationnel). De plus, même si ce sont des étapes demandées de manière institutionnelle, ce ne sont pas celles qui posent le plus de difficultés aux élèves, comme le montrent les études citées ci-dessus. Nous considérons donc qu'elles sont en dehors de la méthode que nous souhaitons enseigner. Nous verrons que nous avons quand même intégré ces étapes à l'EIAH AMBRE-add, afin de suivre le plan de résolution habituellement attendu des élèves.

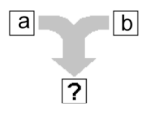
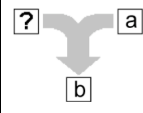
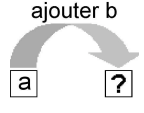
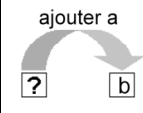
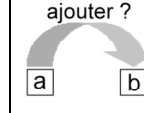
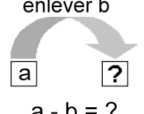
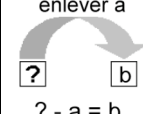
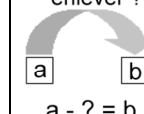
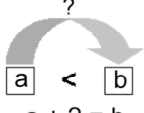
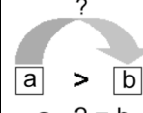
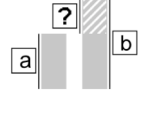
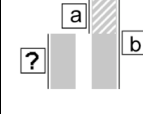

Catégorie réunion	 $a + b = ?$	 $? + a = b$	
Catégorie changement Opérateur "ajouter"	 $a + b = ?$	 $? + a = b$	 $a + ? = b$
Catégorie changement Opérateur "enlever"	 $a - b = ?$	 $? - a = b$	 $a - ? = b$
Catégorie changement Opérateur inconnu	 $a + ? = b$	 $a - ? = b$	
Catégorie comparaison	 $a + ? = b$	 $? + a = b$	 $a + b = ?$

Figure 3. Classification des problèmes additifs

En appliquant le principe du projet AMBRE à la méthode présentée ci-dessus, nous avons développé l'EIAH AMBRE-add que nous présentons dans la partie suivante.

L'EIAH AMBRE-add

Dans cette partie, nous présentons tout d'abord l'EIAH AMBRE-add tel que le connaît l'apprenant, en précisant les fonctionnalités d'aide et de diagnostic qui sont à sa disposition, puis nous décrivons comment est conçu ce logiciel d'un point de vue informatique.

Le Point de Vue de l'Apprenant

Comme nous l'avons présenté auparavant, une séance de travail avec AMBRE-add commence généralement par une présentation de problèmes-type résolus. La suite de la séance est consacrée à la résolution de

² Le symétrique de ce schéma est tout à fait utilisable par l'apprenant.

problèmes. Pour chaque problème, AMBRE-add guide la résolution de l'apprenant en suivant le cycle AMBRE. Après l'étape de lecture de l'énoncé, l'apprenant doit reformuler le problème en le représentant grâce à l'un des schémas présentés dans la partie précédente, en déterminant ce qu'il cherche (la place de l'inconnue) et en précisant ce qu'il connaît (les données numériques du problème). Cette reformulation devient une référence pour la suite de la résolution (cf. Figure 4).

L'apprenant doit ensuite choisir le problème-type le plus proche du problème à résoudre. Les problèmes-type que l'apprenant a déjà vus (en début de séance et pendant les séances précédentes) sont rappelés par leur énoncé et leur reformulation. La reformulation grâce à un schéma facilite la tâche de comparaison de problèmes nécessaire à cette étape.

L'étape suivante consiste pour l'apprenant à rédiger la solution du problème en s'aidant de la solution du modèle qu'il a choisi à l'étape précédente (cf. Figure 5 : modèle à gauche, problème à droite). Selon le niveau (CE1 ou CE2), la deuxième partie de la résolution peut ne pas être demandée.

Enfin, la dernière étape présente à l'apprenant un bilan de la résolution du problème : l'énoncé, sa reformulation et la solution. L'apprenant est invité à ranger ce problème avec l'un des modèles, afin de constituer des groupes de problèmes de même classe. L'EIAH AMBRE-add a été évalué lors d'une expérimentation longitudinale en situation, auprès de trois classes de CE1 (Nogry, Jean-Daubias et Duclosson 2004).

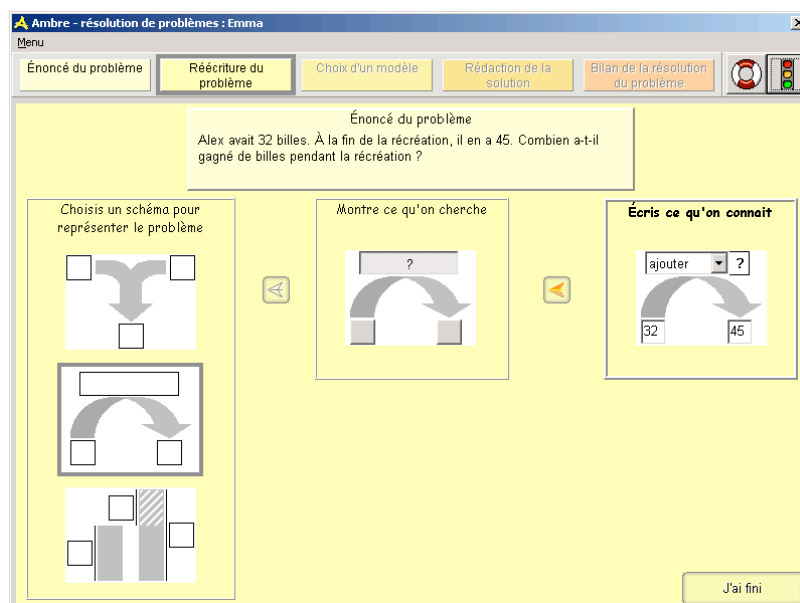


Figure 4. Étape de reformulation

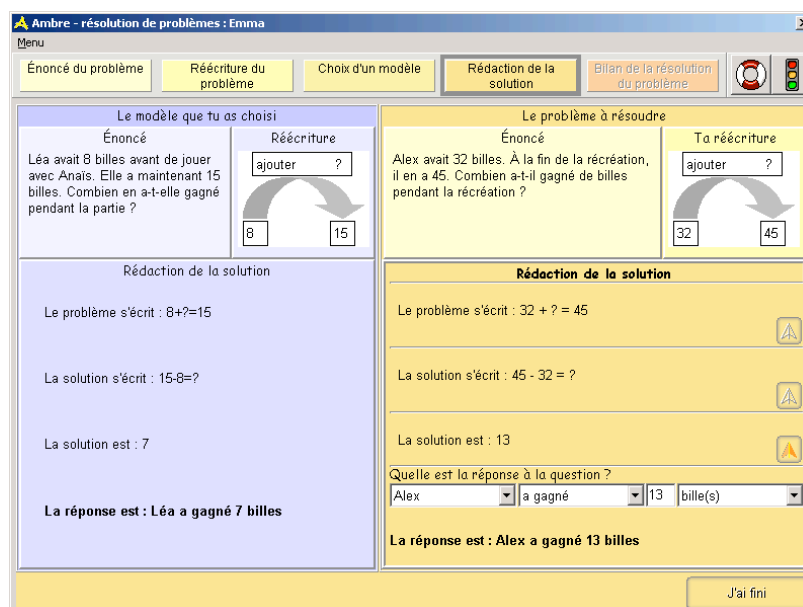


Figure 5. Étape d'adaptation

Aide, Diagnostic et Explications

Pour obtenir de l'aide, l'apprenant peut utiliser le bouton "bouée de sauvetage", le bouton "feu tricolore" lui permettant quant à lui de savoir si ses réponses sont correctes ou non, et d'obtenir une explication en cas d'erreur (cf. Figure 5 en haut à droite). La fenêtre affichant l'aide est bleue ; celle affichant le diagnostic est verte si les réponses sont justes, rouge s'il y a une erreur, et orange si la réponse est correcte d'un point de vue mathématique, mais ne répond pas à ce que l'on demande. C'est à l'enseignant de choisir si l'on peut laisser l'élève continuer malgré une fenêtre orange. Les messages d'aide ou de diagnostic sont souvent à deux niveaux : si le premier message ne suffit pas à l'élève pour comprendre, il peut utiliser le deuxième niveau (cf. Figure 6).

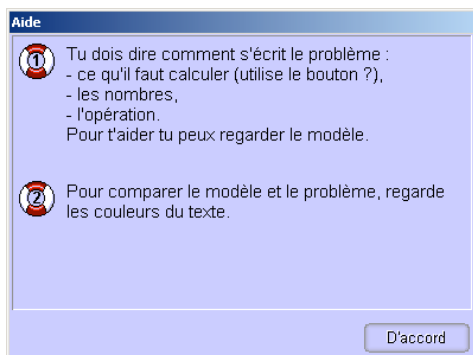


Figure 6. Exemple d'aide

Les messages d'aide consistent souvent à rappeler à l'apprenant ce qu'il doit faire. On met aussi en place des outils destinés à lui faciliter la tâche. Par exemple, pour l'aider à rédiger la solution du problème, on peut mettre dans la même couleur les éléments qui ont le même rôle dans l'énoncé, la reformulation et la résolution du problème-type et du problème à résoudre.

Les messages d'explications faisant suite au diagnostic répondent souvent à une erreur attendue. Par exemple, lors de la rédaction de la phrase de réponse, il est fréquent que les élèves écrivent une phrase qui est dans l'énoncé (par exemple « Alex avait 32 billes »). Dans ce cas, on explique « Ce que tu as écrit est vrai, mais ce n'est pas la réponse à la question ».

Générer un énoncé correspondant à la réponse de l'élève peut souvent lui permettre de comprendre en quoi sa réponse est erronée. Cette fonctionnalité de génération d'énoncé est par exemple utilisée pour expliquer à l'apprenant pourquoi sa reformulation n'est pas correcte (cf. Figure 4), dans le cas où l'erreur vient des nombres qu'il a indiqués (le schéma et la place de l'inconnue étant corrects).

Des éléments graphiques peuvent aussi être utilisés pour les messages d'explications sur les erreurs, parce que l'on ne sait pas interpréter la réponse de l'apprenant, ou parce que cela vaut mieux qu'un grand discours. On peut ainsi mettre en vert les éléments de la réponse qui sont corrects et en rouge ceux qui sont erronés (cf. Figure 7, *a perdu* et *11* sont en rouge, *Alex* et *bille(s)* sont en rouge).

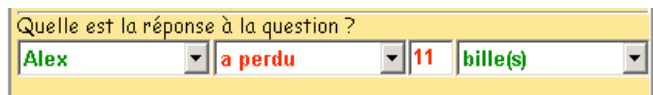


Figure 7.

Architecture Informatique

L'EIAH AMBRE-add comporte principalement une interface et un système à base de connaissances. Ce système à base de connaissances, CHAMADE-add, est issu de l'architecture CHAMADE que nous présenterons dans la partie suivante. Réalisé en Prolog, il modélise les connaissances du domaine ainsi que des connaissances pédagogiques afin de fournir à l'apprenant des messages d'aide et de diagnostic de ses réponses. L'interface, réalisée en Delphi, fait appel à CHAMADE-add lorsque c'est nécessaire. Des fichiers texte et XML servent à faciliter la communication entre l'interface et CHAMADE-add.

Représentation des Connaissances : l'Architecture CHAMADE

Nous avons expliqué dans la première partie que le résolveur d'un "tuteur donneur de leçons de méthodes" doit fonctionner selon la méthode qu'il souhaite enseigner (Rogalski 1994). Pour satisfaire cette exigence, nous avons conçu l'architecture SYRCLAD (Guin-Duclosson 1999) qui nous permet de réaliser un résolveur de problèmes appliquant une méthode. Afin de pouvoir fournir à l'apprenant des messages d'aide, et pour être capable de diagnostiquer ses réponses et de lui expliquer ses erreurs, nous avons conçu l'architecture CHAMADE, que nous décrirons après avoir présenté l'architecture SYRCLAD.

L'Architecture SYRCLAD

L'architecture de résolveurs SYRCLAD (SYstème de Résolution de problèmes fondé sur la CLASSification du Domaine) permet d'explicitier de manière déclarative une classification de problèmes et les connaissances de reformulation et de résolution qui y sont liées (cf. Figure 8). Elle permet ainsi de proposer une modélisation des connaissances que l'on cherche à observer chez les apprenants.

Pour un domaine donné, un expert (didacticien, enseignant...) définit une hiérarchie de classes de problèmes. Pour pouvoir utiliser cette hiérarchie afin d'identifier la classe d'un problème, il faut définir des connaissances de reformulation qui permettent de déterminer les valeurs des attributs discriminants de la hiérarchie de classification. Certaines classes de la hiérarchie, dites opérationnelles, sont suffisamment spécifiques pour qu'on puisse associer à chacune une technique de résolution adaptée aux problèmes qui relèvent de cette classe.

Résoudre un problème consiste alors tout d'abord en une phase d'opérationnalisation, où le système utilise les connaissances de reformulation et le graphe de classification pour déterminer de quelle classe relève le problème et pour construire un nouveau modèle de ce problème (appelé modèle opérationnel).

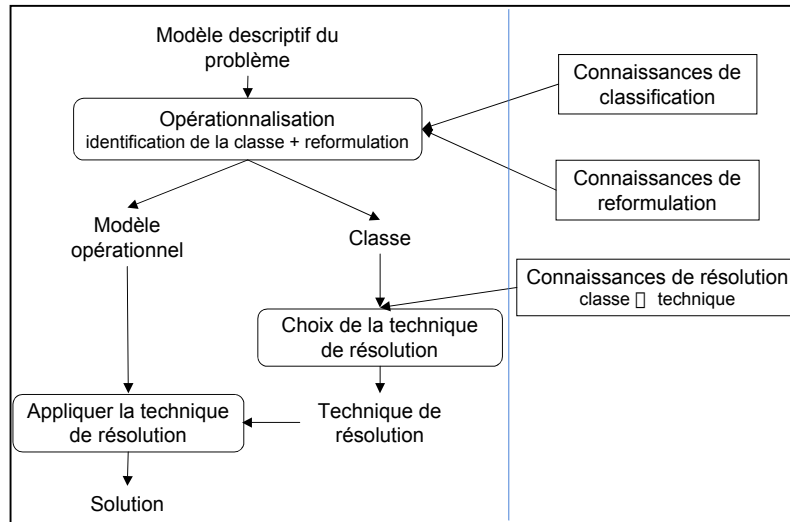


Figure 8. L'architecture SYRCLAD

Ce modèle est essentiellement composé des attributs discriminants de la hiérarchie, mais aussi d'attributs qui instancient le problème par rapport à la classe dont il relève. Ce modèle opérationnel est débarrassé des traits de surface du modèle descriptif (c'est-à-dire des éléments du problème non pertinents pour la résolution). La résolution proprement dite consiste alors à appliquer la technique de résolution associée à la classe du problème au modèle opérationnel, afin d'obtenir une solution au problème posé.

Dans l'architecture SYRCLAD, le formalisme de représentation des trois types de connaissances (classification, reformulation et résolution) ainsi que les processus (opérationnalisation, choix et application de la technique de résolution) sont indépendants du domaine. Lorsque l'on définit pour un domaine les trois bases de connaissances, on obtient un résolveur de problèmes du domaine (partie gauche de la Figure 8). Cette architecture a été appliquée à quatre domaines (Guin-Duclosson 1999).

Pour le domaine des problèmes additifs, les attributs discriminants du graphe de classification sont le type du problème, la nature de l'inconnue, l'opérateur, etc. Les classes opérationnelles sont celles présentées sur la Figure 3. Les connaissances de reformulation déterminent la valeur de ces attributs à partir de l'énoncé du problème. Les techniques de résolution associées aux classes opérationnelles sont les opérations à trou également présentées sur la Figure 3. Le résolveur SYRCLAD-add (SYRCLAD pour les problèmes additifs) ne permet pas à lui seul de fournir de l'aide à l'apprenant, ni de diagnostiquer ses réponses ou de lui expliquer ses erreurs. Pour assurer ces fonctionnalités, nous avons ajouté autour de SYRCLAD-add des bases de connaissances qui constituent l'architecture CHAMADE, que nous présentons maintenant.

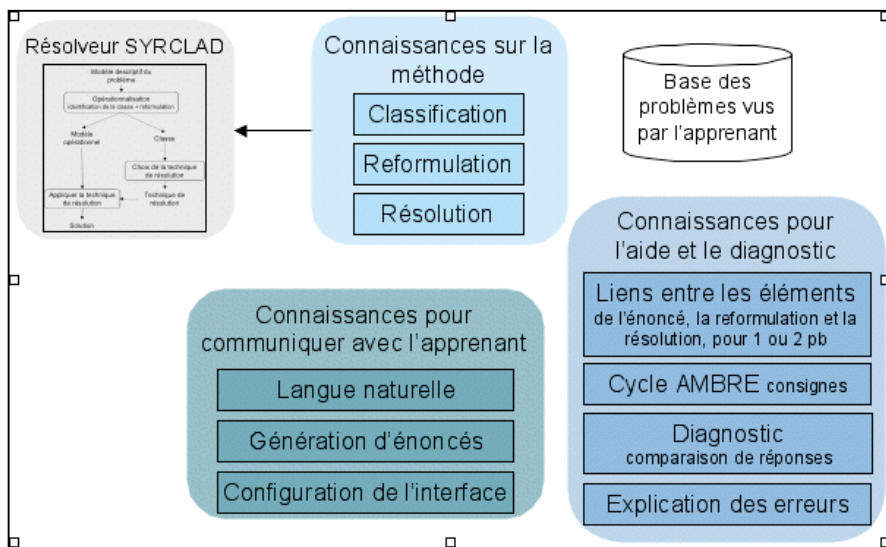


Figure 9. L'architecture CHAMADE

L'architecture CHAMADE

L'architecture CHAMADE (arCHitecture pour l'Apprentissage de Méthodes permettant Aide, Diagnostic et Explications) contient tout d'abord un résolveur SYRCLAD ainsi que les connaissances sur la méthode associées. Elle contient de plus deux grands groupes de connaissances : celles destinées à la communication avec l'apprenant, et celles destinées à diagnostiquer les réponses de l'apprenant et à construire les messages d'aide et d'explication des erreurs. De plus, une base de problèmes contient les problèmes-type déjà présentés à l'apprenant ainsi que les problèmes qu'il a déjà résolus (cf. Figure 9).

Les connaissances destinées à la communication avec l'apprenant sont de trois types :

- Les connaissances liées à la langue naturelle, qui permettent de construire des messages grammaticalement corrects.
- Les connaissances permettant de générer un énoncé de problème, ou une formulation en langue naturelle d'une connaissance du domaine.
- Les connaissances destinées à fournir à l'interface des éléments qu'elle interprète afin de par exemple choisir la couleur des fenêtres (vert, rouge ou orange), mettre en couleur des éléments du problème ou de la réponse de l'apprenant, ou construire des listes déroulantes (en effet, pour rédiger la phrase de réponse, l'apprenant utilise des listes déroulantes contenant des éléments choisis par CHAMADE-add, grâce à sa connaissance du problème).

Les connaissances destinées à l'aide et au diagnostic sont de quatre types :

- Afin de pouvoir mettre en évidence (grâce à des couleurs) les éléments analogues de l'énoncé, de la reformulation et de la solution, et afin de pouvoir les mettre en relation avec les éléments analogues d'un autre problème, il est nécessaire de connaître le rôle de chacun de ces éléments et leurs liens.
- Afin de pouvoir rappeler à l'apprenant ce qu'il doit faire en cas de demande d'aide, il est nécessaire de connaître de manière détaillée le cycle AMBRE utilisé dans l'EIAH, et son application au domaine choisi.
- Afin de pouvoir diagnostiquer les réponses de l'apprenant, il est nécessaire de définir comment comparer celles-ci à l'ensemble des réponses correctes fournies par le résolveur SYRCLAD.
- Afin de pouvoir donner à l'élève des explications pertinentes sur ses erreurs, il est nécessaire de définir un ensemble de réponses erronées attendues, et d'y associer des messages explicatifs. Il faut également prévoir comment aider l'élève à remédier à une erreur que le système n'a pas su interpréter. Enfin, il peut être nécessaire de recontextualiser un message d'erreur.

L'ensemble des connaissances que nous venons de décrire peut être utilisé par CHAMADE pour répondre à trois types de demande : une demande directe de l'interface, une demande d'aide de l'apprenant, ou une demande de diagnostic de l'apprenant :

- L'interface fait appel à CHAMADE, et plus précisément au résolveur SYRCLAD, pour présenter à l'apprenant en début de séance des problèmes-type résolus. L'interface a également besoin de connaître les problèmes-type qu'a déjà vus l'apprenant pour lui demander de choisir un problème-type ; elle doit aussi savoir quels problèmes a déjà résolus l'apprenant et à quel problème-type il les a associés afin de lui permettre de consulter les problèmes rangés avec un problème type. L'interface peut également faire appel à CHAMADE pour constituer des éléments d'interface tels que les listes déroulantes décrites ci-dessus.
- Lorsque l'apprenant demande de l'aide, l'interface indique à CHAMADE quel est exactement l'avancement de l'élève dans le cycle AMBRE. CHAMADE construit alors un message d'aide en utilisant ses connaissances sur le cycle AMBRE et ses connaissances liées à la langue naturelle. Afin de pouvoir mettre en évidence les éléments analogues du problème-type et du problème à résoudre, comme présenté précédemment, CHAMADE utilise également les connaissances sur les liens entre ces éléments ainsi que les connaissances du résolveur SYRCLAD sur les deux problèmes.
- Lorsque que l'apprenant demande un diagnostic de ses réponses, CHAMADE procède en deux temps. Dans un premier temps, le système utilise ses connaissances de diagnostic pour comparer les réponses de l'élève à celles du résolveur. Dans un deuxième temps, il construit en cas d'erreur un message d'explication ou des informations que l'interface mettra en œuvre visuellement. Pour cela, il utilise les connaissances d'explication des erreurs, en s'appuyant sur le résolveur SYRCLAD, ainsi que l'ensemble des connaissances destinées à la communication avec l'apprenant.

Nous avons dans cette partie présenté les connaissances de l'architecture CHAMADE et comment elles sont utilisées pour répondre aux demandes de l'interface ou de l'apprenant. En appliquant SYRCLAD à quatre domaines, nous avons démontré la généricité de cette architecture pour la réalisation de solveurs de problèmes utilisant des méthodes. En ce qui concerne l'architecture CHAMADE, même si nous avons procédé selon une démarche analogue, il faudrait l'utiliser dans un EIAH AMBRE appliqué à un autre domaine afin de montrer sa généricité.

Conclusion, Perspectives de Recherche

Dans cet article, nous avons présenté les connaissances utilisées dans l'EIAH AMBRE-add, en décrivant la méthode que nous souhaitons enseigner dans le domaine des problèmes additifs, et comment l'architecture CHAMADE nous permet de représenter les connaissances de la méthode et celles permettant de fournir de l'aide à l'apprenant, de diagnostiquer ses réponses et de lui donner des explications sur ses erreurs.

Les perspectives du projet AMBRE s'articulent autour de deux axes de recherche.

Le premier axe de recherche a pour objectif de créer un ensemble d'activités autour de AMBRE-add, afin de concevoir un environnement plus large pour une utilisation du CP au CM2. Nous travaillons avec des enseignants afin d'identifier et de construire ces activités qui devraient contribuer à une meilleure intégration du logiciel dans les classes. Ces activités ne relèvent pas directement du RàPC mais se focalisent sur certaines compétences liées à la résolution de problèmes additifs.

Le deuxième axe de recherche vise à étudier comment transformer AMBRE-add pour qu'il puisse s'adapter non seulement aux spécificités de l'apprenant, mais également à celles du contexte d'apprentissage. Notre objectif est que l'environnement puisse être utilisé dans des situations pédagogiques variées s'adressant à des publics d'âges variés et de profils différents. Dans ce but, nous concevons des outils permettant aux enseignants de personnaliser l'environnement, de créer des séquences d'apprentissage, de générer les problèmes qu'ils souhaitent faire résoudre à leurs élèves, et même de créer de nouveaux thèmes d'exercices.

Afin de permettre à l'environnement de proposer ces outils aux enseignants, nous devons probablement modifier l'architecture CHAMADE afin qu'elle ait la souplesse nécessaire pour s'adapter aux demandes des enseignants.

Remerciements

Le travail présenté dans cet article est celui de l'ensemble de l'équipe AMBRE : Stéphanie Jean-Daubias, Sandra Nogry, Philippe Daubias et François Fallet-Kahn.

Le projet AMBRE a bénéficié du soutien du programme interdisciplinaire STIC-SHS « Société de l'Information » du CNRS.

Références

Aamodt A. and Plaza E. 1994. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches. *Artificial Intelligence Communications* 7 : 39-59.

Cauzinille-Marmèche E. et Didierjean A. 1998. Raisonnement par analogie et généralisation des connaissances. Netchine-Grynberg G. (Ed.) *Développement et fonctionnement cognitif : vers une intégration*. Paris, Presses Universitaires de France.

Damm R. 1992. Apprentissage des problèmes additifs et compréhension de texte. Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Fayol M. 1990. *L'enfant et le nombre*. Delachaux & Niestlé, Chap. 6.

Fisher J.-P. 1979. La perception des problèmes soustractifs aux débuts de l'apprentissage de la soustraction. Thèse de 3^{ème} cycle en Didactique des Mathématiques, Université Nancy 1.

Fisher J.-P. 1993. La résolution des problèmes arithmétiques verbaux : propositions pour un enseignement pro-actif. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives* 5 : 177-210, IREM de Strasbourg.

Greeno J.G. and Riley M.S. 1987. Processes and Development of Understanding. Weinert F.E. and Kluwe R.H. (Eds.) *Metacognition, motivation and understanding*, Chap. 10, 289-313.

Guin D. 1991. La notion d'opérateur dans une modélisation cognitive de la compréhension des problèmes additifs. *Math. Inf. Sci. Hum.* 29^{ème} année, n° 113 : 5-33.

Guin-Duclosson N. 1999. SYRCLAD : une architecture de solveurs de problèmes permettant d'explicitier des connaissances de classification, reformulation et résolution. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 13-2 : 67-94, Paris, Hermès.

Guin-Duclosson N., Jean-Daubias S. et Nogry S. 2002. The Ambre ILE: How to Use Case-Based Reasoning to Teach Methods. *Intelligent Tutoring Systems*, Springer, 782-791.

Jean-Daubias S. 2004. De l'intégration de chercheurs, d'experts, d'enseignants et d'apprenants à la conception d'EIAH. *TICE'2004*, Compiègne.

Kolodner J. 1993. *Case Based Reasoning*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers.

Marthe P. 1982. Problèmes de type additif et appropriation par l'élève des groupes additifs Z et D entiers relatifs et décimaux relatifs. Thèse de 3^{ème} cycle, EHESS, Paris.

Mille A. 1998. Associer expertise et expérience pour assister les tâches de l'utilisateur. Habilitation à diriger des recherches, Université Claude Bernard - Lyon1.

Nogry S., Jean-Daubias S. et Guin-Duclosson N. 2002. La psychologie cognitive au service de la conception de l'environnement d'apprentissage AMBRE, *TICE'2002*, Lyon, 195-202.

Nogry S., Jean-Daubias S. et Duclosson N. 2004. ITS evaluation in classroom: the case of AMBRE-AWP, *ITS'2004*, Brazil.

Riley M.S, Greeno J.G. and Heller J.I. 1983. Development of children's problem-solving ability in arithmetic. Ginsburg H.P. (Ed.) *The development of mathematical thinking*. New-York : Academic Press.

Rogalski M. 1994. Les concepts de l'EIAO sont-ils indépendants du domaine ? L'exemple d'enseignement de méthodes en analyse. *Recherches en Didactiques des Mathématiques* 14 - 1.2 : 43-66.

Schoenfeld A. 1985. *Mathematical Problem Solving*. New York: Academic Press.

Vergnaud G. 1982. A classification of cognitive tasks and operations of thought involved in addition and subtraction problems. Carpenter T.P., Moser J.M. and Romberg T.A. (Eds.) *Addition and subtraction : A cognitive perspective*. Hillsdale: Erlbaum.

Vergnaud G. 1985. Concepts et schèmes dans une théorie opératoire de la représentation. *Psychologie française* : 245-251.

Willis G.B. and Fuson K.C. 1988. Teaching children to use schematic drawings to solve addition and subtraction word problems. *Journal of Educational Psychology* 80 : 192-201.