

EIAH et apprentissage de l'algèbre élémentaire : les projets Pépite et Lingot

Brigitte GRUGEON-ALLYS

IUFM d'Amiens, DIDIREM (Paris7)

Élisabeth DELOZANNE

IUFM de Créteil, Laboratoire d'Informatique de l'Université du Maine¹

Les projets Pépite et Lingot que nous présentons ici sont des projets fondamentalement pluridisciplinaires. Ils s'inscrivent dans l'histoire des EIAH mais aussi dans l'histoire, d'une part de travaux en didactique des mathématiques sur la technologie informatique et, d'autre part, des travaux de recherche en informatique sur la conception de logiciels destinés à favoriser des apprentissages.

Pour ce qui concerne la didactique des mathématiques, jusqu'à une période récente, les travaux ont surtout porté sur les utilisations de « micromondes » - en particulier les logiciels de géométrie dynamique, les CAS, les tableurs- et ont peu pris en compte comme objets d'étude des logiciels "d'aide à l'apprentissage". Ceux-ci étaient sans doute encore trop pauvres en termes de choix des tâches prescrites, d'analyse du fonctionnement des élèves, de rétroactions. Après vingt années de recherche dans ce domaine, les chercheurs ont été sensibilisés aux difficultés que pose l'intégration des TICE et à la nécessité de mener des recherches qui sachent articuler à la fois la modélisation et le développement informatiques, l'attention portée à l'élève et à son développement cognitif et l'attention portée à l'enseignant, à la réalité de son travail, à l'évolution de ses compétences professionnelles. Aussi en mettant sur pied le projet LINGOT, il s'agit pour nous de concevoir et mettre à disposition des enseignants des outils performants qui les assistent dans les nouvelles tâches de plus en plus complexes qui leur sont confiées (enseignement sur mesure, gestion de l'hétérogénéité des classes, aide individualisée aux élèves). Ces nouvelles tâches nécessitent de prendre en compte une analyse fine des productions des élèves pour comprendre leurs modes de fonctionnement et pouvoir ainsi agir de façon plus efficace sur l'apprentissage. Nous faisons les hypothèses que d'une part, la mise à disposition d'outils informatiques d'assistance à l'activité des enseignants contribue à rendre opérationnelles des recherches en didactique des mathématiques et à favoriser la diffusion de leurs résultats dans le corps social et que, d'autre part, la création de prototypes informatiques avancés permet des expérimentations qui aident à tester des hypothèses et faire surgir de nouvelles thématiques de recherche dans les deux domaines.

¹ É. DELOZANNE fait maintenant partie du Centre de Recherches en Informatique de l'Université Paris 5 (CRIP5), mais les travaux présentés ici ont été effectués dans le cadre du LIUM et de l'équipe de recherche STICE de l'IUFM de Créteil.

1. Le projet LINGOT

Présentation et objectifs

Avec le projet Lingot, nous proposons un travail de recherche pluridisciplinaire dont l'objectif est de créer des assistants informatiques pour l'enseignement et l'apprentissage qui ne soient pas fondés exclusivement sur des fonctionnalités proposées mais fondés

- d'une part, sur des recherches menées dans divers domaines pour concevoir des situations d'apprentissage qu'ils rendent possibles et
- d'autre part, sur des modélisations informatiques qui permettent la réalisation de prototypes que l'on peut tester d'abord en laboratoire puis dans des conditions "écologiquement valides". Réciproquement ces environnements informatiques permettent de valider, tester, discuter, compléter, systématiser ou infléchir les études de départ, en particulier les études didactiques.

Pour développer notre recherche, nous avons choisi un domaine d'apprentissage, celui de l'algèbre à la fin de la scolarité obligatoire, l'algèbre constituant un outil privilégié des mathématiques et un verrou d'accès à l'enseignement scientifique.

Un projet pluridisciplinaire

Cette approche nécessite donc la collaboration entre plusieurs domaines de recherche : la didactique des mathématiques, la psychologie et l'ergonomie cognitive, l'Interaction Humains Machines (IHM) et l'Intelligence Artificielle (IA) en articulation avec les Environnements informatiques d'apprentissage humain (EIAH).

Nous cherchons à articuler ces recherches pour :

- modéliser des cohérences de fonctionnement des élèves dans un domaine vaste celui de l'algèbre élémentaire, c'est l'axe diagnostic du projet,
- associer des stratégies d'apprentissage personnalisées en fonction du diagnostic établi, c'est l'axe apprentissage du projet²,
- adopter une « approche intégrée de la conception de logiciel », c'est-à-dire une approche qui ne se limite pas à définir les fonctionnalités du logiciel mais étudie les conditions de son intégration dans les pratiques quotidiennes des enseignants, c'est l'axe instrumentation de l'activité enseignante du projet.

Ces approches sont adoptées entre autres par des chercheurs en EIAH comme Koedinger aux États Unis (Koedinger 1997, Hefferman et Koedinger 2002) et Stacey en Australie (Stacey et al. 2003). Par exemple, Koedinger et son équipe développe des tuteurs intelligents comme une des ressources disponibles dans le cadre de la mise sur pied d'un curriculum avec les livres et textes imprimés et la formation des professeurs qui accompagnent ce nouveau curriculum

La collaboration entre la didactique des mathématiques, l'informatique, la psychologie et l'ergonomie cognitive existe de longue date. Les trois domaines ont une tradition de collaboration scientifique qui s'est nouée dans diverses instances en particulier le PRC IA, le GDR Didactique (Balacheff et Vivet 94), la revue Sciences et Techniques éducatives (STE) et aujourd'hui la revue STICEF (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation. Cette collaboration est restée active au niveau national avec la création du RTP 39 par exemple comme international. De plus, le groupe EIAH et Mathématiques du LIUM et l'équipe DIDIREM de Paris 7 ont depuis une quinzaine d'années mis en œuvre une synergie et acquis une expérience reconnue de travail interdisciplinaire. Ces travaux ont donné lieu à 3 Thèses, 6 DEA et des publications :

Dans le cadre du projet Pépite (diagnostic)

² Le nom des projets s'appuie sur la métaphore d'aller chercher dans les productions des élèves les granules de connaissances (les Pépites) qui permettront de construire des connaissances mathématiques (des Lingots).

- Thèse en informatique de S. Jean (1996-2000), DEA d'informatique J. Provost (Provost 1999),
- DEA de didactique d'A. Lenfant (Lenfant 1997), B. Hasquenoph (Hasquenoph 1998), S. Iamarène (Iamarène 1998),
- Expérimentations auprès d'enseignants (2000-2002)

Dans le cadre du projet Lingot (diagnostic et apprentissage)

- DEA d'informatique de D. Rogozan (Rogozan 2000), D. Rasseneur (Rasseneur 2001), D. Prévité (Prévité 2002) J.-C. Péna (Péna 2003)
- DEA de didactique de S. Mairèsse (2003)

Ces expériences passées nous ont montré la nécessité d'élargir les équipes en direction des IUFM pour travailler dans le champ de la formation des enseignants et avoir ainsi un large champ d'expérimentation des modèles mis au point, en contexte scolaire. Elles nous ont montré aussi la nécessité de prendre en compte la dimension ergonomique dans l'analyse de l'intégration dans les pratiques de ces outils d'assistance à l'apprentissage ou à l'enseignement.

Le projet Lingot³ mobilise donc à l'heure actuelle six partenaires :

- LIUM, Université du Maine (E. Delozanne, P. Jacoboni) : recherche en EIAH sur la modélisation des connaissances des élèves et interaction humain / machine,
- Equipe de didactique des Mathématiques DIDIREM de l'université Paris 7 (M. Artigue, B. Grugeon-Allys),
- Laboratoire Cognition et Activités Finalisées, laboratoire CNRS-Univ Paris 8 (J. Rogalski)
- IUFM d'Amiens (B. Grugeon-Allys),
- Equipe STICE de l'IUFM de Créteil (E. Delozanne, L. Coulange),
- Equipe SASO, Université J.V. d'Amiens

Sur ce projet sont en cours :

- 3 thèses en informatique de V. Larue, D. Prévité, J.-C. Péna
- 1 DEA d'informatique de C. Vincent

Nous présentons ici les travaux précurseurs, les hypothèses et questions de recherche, le projet Pépète et les recherches en cours. Avant de revenir sur les questions de recherche et de présenter nos réflexions sur les apports et les difficultés d'un tel travail pluridisciplinaire, nous présentons les travaux précurseurs.

Les travaux précurseurs

Les travaux précurseurs sur lesquels s'appuient le projet LINGOT sont la thèse en didactique des Mathématiques de B. Grugeon (1995) et les travaux en EIAO au LIUM (Vivet 1991, Bruillard et Vivet 1994, Delozanne 1994, Dubourg 1995).

Fondements didactiques

Ce projet s'appuie sur des résultats de la thèse de B. Grugeon (1995). La problématique globale de la thèse visait à étudier les problèmes de transition institutionnelle dans le système

³ Il bénéficie du soutien financier de ces différents partenaires et aussi de celui du Ministère de la recherche (Programme Cognition appel 2002) et de la région Picardie.

éducatif. Cette étude avait été menée à travers celle des rapports institutionnels et personnels à l'algèbre élémentaire qui se développent dans la transition entre les filières d'enseignement professionnel et les filières correspondantes de l'enseignement général de lycée. Cette recherche concernant des phénomènes complexes avait montré la nécessité d'articuler plusieurs cadres théoriques, en particulier, la théorie anthropologique (Chevallard 1992) pour prendre en compte le côté institution, mais aussi la dialectique outil-objet (Douady 1984), du côté savoir, les champs conceptuels (Vergnaud 1992) et la didactique de l'algèbre pour prendre en compte le côté élève (Sfard, Kieran).

I. Champ conceptuel de l'algèbre

Le modèle de la compétence algébrique conçu à ce niveau scolaire repose sur une vision de l'algèbre et de sa transposition didactique. Ce champ conceptuel, qui ne saurait réduire l'algèbre à un jeu formel d'écritures, est approché à la fois :

dans sa dimension *objet*, avec les objets de l'algèbre, incluant les expressions, les formules, les équations et les systèmes de représentation associés à ces objets, le système de représentation symbolique algébrique en articulation avec d'autres systèmes de représentation en particulier les registres du langage naturel, des écritures numériques, des figures, des représentations graphiques, et dans sa dimension *outil*, par les diverses fonctionnalités selon les champs de problèmes abordés, en particulier,

- comme outil de résolution de problèmes via leur modélisation pour des problèmes arithmétiques formulés en langue naturelle sous forme d'équations mais au-delà des problèmes intra ou extra mathématiques sous forme de relations fonctionnelles entre données et variables,

mais aussi,

- comme outil de généralisation et de preuve dans les cadres numérique et géométrique
- comme outil de transformation dans le cadre algébrique et fonctionnel.

Nous avons donc défini un modèle multidimensionnel de la compétence algébrique à ce niveau scolaire. Au delà de la caractérisation des praxéologies mathématiques en algèbre en jeu dans les institutions, ce modèle permet de caractériser le rapport personnel des élèves à l'algèbre puis de les mettre en relation avec les praxéologies en jeu dans cette institution.

II. Un outil de diagnostic

Cette recherche nous a conduit en particulier à concevoir un outil diagnostic pour décrire les rapports personnels d'élèves à l'algèbre élémentaire. Il est constitué d'un ensemble de tâches diagnostiques recouvrant le domaine algébrique. Ce sont des tâches de production et de transformation d'expressions algébriques, des tâches de modélisation pour des problèmes arithmétiques formulés en langue naturelle mais au-delà pour des problèmes intra ou extra mathématiques sous forme de relations fonctionnelles entre données et variables, des tâches de généralisation et de preuve et des tâches d'interprétation. Une grille d'analyse, s'appuyant sur le modèle multidimensionnel de compétence algébrique, permet d'analyser les productions des élèves. Cette grille prend en compte les différentes composantes du modèle en termes de critères.

Le diagnostic permet ainsi de dresser un panorama cognitif de chaque élève. La description obtenue, au niveau microscopique étant trop complexe, il a été nécessaire de passer de ce niveau microscopique à un niveau macroscopique, pour pouvoir définir une synthèse significative et opératoire de ce panorama cognitif. En effet, l'enjeu du diagnostic est de mettre en évidence des cohérences de fonctionnement et, pour ceci, nous réalisons un

recoupement transversal des réponses aux tâches, pour chaque composante, critère par critère, afin de rechercher des modalités de fonctionnement, descripteurs de régularités caractéristiques des traits de comportement des élèves en algèbre élémentaire, les cohérences de fonctionnement en algèbre. Cette étude nous amène à définir le profil de l'élève en algèbre élémentaire comme une description des principaux traits de son comportement en algèbre élémentaire qui donne un modèle intelligible de son rapport personnel à l'algèbre.

Nous avons retenu trois niveaux de description pour définir les principaux traits de fonctionnement, le premier niveau résume les compétences algébriques en termes de réussite/échec par rapport à un niveau attendu, le deuxième pointe les cohérences de fonctionnement composante par composante, le troisième décrit la flexibilité dans l'articulation entre registres de représentation.

Ce travail de thèse a donné des résultats perçus, du point de vue de l'EIAH, comme intéressants pour un travail de modélisation informatique. Pour les informaticiens, les modèles issus de sciences humaines apparaissent souvent trop « discursifs » pour être implémentés. Or ces travaux de didactique des mathématiques présentaient des descriptions dont le niveau de structuration les rendaient exploitables aux yeux des informaticiens. Plusieurs résultats étaient en jeu, en particulier, la définition d'un modèle multidimensionnel de la compétence algébrique dans l'enseignement secondaire qui a permis la construction d'un outil de diagnostic papier-crayon, l'identification de cohérences de fonctionnement en algèbre qui a permis une description de profils cognitifs, la diversité des entrées possibles dans le champ de l'algèbre. De plus, cette recherche dans la jonction enseignement professionnel / général, en écho à la perspective anthropologique développée, avait permis de prendre conscience de la multiplicité des points d'entrée dans l'algèbre et de penser en particulier à côté de situations classiques, des situations d'apprentissage qui permettent une évolution du rapport à la technique.

Fondements informatiques

Au niveau informatique, ce travail se situe dans les problématiques de conception d'environnements d'apprentissage dans des logiques d'usage développées au LIUM (Vivet et al. 1994, Bruillard et al. 2001). Il s'appuie sur des méthodologies issues de la didactique des mathématiques (Artigue 1988) et issues du domaine de l'Interaction Humains – Machines.

Ces travaux en didactique des mathématiques ont suscité un intérêt très grand de la part de l'équipe d'informaticiens du LIUM dirigée à l'époque par M. Vivet et maintenant par P. Tchounikine. Tout d'abord, cette équipe cherchait à concevoir des environnements informatiques s'appuyant sur des modèles de connaissances ou des modèles d'interaction ayant une pertinence pédagogique, ce qui nécessite un travail en commun avec des experts du domaine enseigné et avec des experts de l'enseignement et de l'apprentissage de ce domaine. Une réflexion sur des méthodes de travail pluridisciplinaire pour la conception de logiciels d'apprentissage et d'enseignement a donc été menée (Bruillard et al. 2000). Des travaux de modélisation des métaconnaissances nécessaires pour résoudre des problèmes de calcul de primitives nous ont amenés à travailler avec M. Rogalski du laboratoire Didirem de l'Université Paris7 (Rogalski 94, Delozanne 94). Cette coopération s'est poursuivie avec une recherche sur l'apprentissage des équations de droites (Dubourg 95). Comme nous l'avons indiqué, les premiers travaux de B. Grugeon sur les profils cognitifs en algèbre nous sont apparus comme une base de travail très prometteuse pour avancer sur un thème de recherche très important dans la communauté IA&ED (Intelligence Artificielle et éducation) : la modélisation des connaissances de l'élève et leur diagnostic. Trois points nous semblaient importants dans le travail de Grugeon :

- Cette étude n'établissait pas un catalogue d'erreurs sur un petit domaine, mais recherchait des cohérences dans les réponses de l'élève sur un domaine assez vaste.

- Les analyses de tâches, la méthode et la grille de diagnostic, les profils à construire étaient décrits de façon assez structurée pour qu'un travail de modélisation informatique soit possible.

- Enfin la complexité de l'analyse justifiait la conception d'un assistant informatique pour pouvoir envisager une intégration dans les pratiques des enseignants.

De plus, très tôt M. Vivet a défendu l'idée que les environnements devaient prendre en compte le rôle du maître dès les phases de conception et P. Leroux a développé un système d'assistance au formateur (Leroux 1995). Ce thème de l'assistance au professeur était (et est toujours) un thème de recherche actif en EIAH, spécialement dans cette équipe. Enfin le travail en commun avec des didacticiens nous avaient amenés à mettre au point une méthodes de conception itérative fondée sur des analyses préalables, sur la création de maquettes et des tests précoces auprès des utilisateurs (enseignants ou élèves) et à nous intéresser de près non seulement aux méthodes de modélisation issues de l'intelligence artificielle mais aussi aux méthodes issues du domaine des Interactions Humains Machines (IHM), en particulier en ce qui concernent les méthodes de conception et d'évaluation "centrées utilisateur", centrée sur l'activité et les méthodes de conception participatives les modélisations conceptuelles des interfaces utilisateur et les modélisations des tâches et de l'activité (Nardi 1996, Mackay et al. 1997, Helander 1997), (Kolski 2001 a et b), (Delozanne et al. 2001).

Schématiquement vers la fin des années 80 nous voulions concevoir des Tuteurs Intelligents ie une machine qui enseignerait la connaissance dont elle disposerait. Début des années 90, l'accent est mis sur l'interaction d'un ou plusieurs élèves, avec un environnement et prenant en compte le contexte ou le dispositif de formation et le rôle de l'enseignant : "Une situation d'apprentissage s'entend comme une situation incluant divers acteurs contraints : les apprenants et les activités qu'ils sont censés effectuer, le maître et le rôle qu'il doit jouer ainsi que le système informatique et la place assignée à ce dernier. Il s'agit d'une interaction entre des individus et des outils, choisis et définis pour remplir une fonction précise dans cette situation : des objectifs de formation étant fixés, il s'agit que l'apprenant apprenne" (Bruillard et Vivet 1994).

Une série de travaux, se sont ainsi centrés sur le rapport entre les outils logiciel proposés et les connaissances construites par les élèves (Bruillard et al. 2000). Ces recherches ont en particulier défendu l'idée de création d'un système de spécifications des situations d'apprentissage relié à des processus d'évaluation précoces des environnements ainsi conçus. La conception de situations d'interaction fait apparaître trois éléments importants : l'analyse cognitive, épistémologique et didactique explicitant un problème d'enseignement (connaissance en jeu, public cible, enseignement usuel, difficultés des élèves), la spécification du contexte d'usage (dispositif d'enseignement, ressources humaines et matérielles, objectifs des séances, mode d'utilisation, mode de communication et type de suivi) et enfin les activités et le paramétrage de ces activités qui permettent de définir une famille de situations d'interactions. Des prototypes ont été conçus pour valider ces modèles (Élise puis Repères) en en adoptant une méthode de conception itérative et centrée utilisateur

- Partir d'un problème d'enseignement et, si possible, d'une analyse didactique,
- Travailler au sein d'une équipe composée d'informaticiens, de didacticiens et d'enseignants et ce, dès les premières phases de conception du projet,
- Utiliser le modèle de situation d'interaction et construire des maquettes pour aider à établir les spécifications du système à construire,
- Evaluer ces maquettes le plus tôt possible auprès des deux catégories d'utilisateurs : enseignants et étudiants ou élèves en laboratoire et sur le terrain,
- Centrer la conception sur les interactions apprenant – système (ou sur les interactions médiées par le système, des apprenants entre eux et avec l'enseignant) et les spécifier en fonction des objectifs d'apprentissage pour l'apprenant et de la situation d'apprentissage.

Hypothèses de recherche

Voilà tracée à grands traits le contexte de la mise sur pied des projets Pépité et Lingot.

Dans un premier temps nous avons émis l'hypothèse qu'une automatisation partielle de l'outil de diagnostic mis au point par B. Grugeon était possible. M. Artigue et B. Grugeon étaient intéressées mais sceptiques. Deux questions essentielles les préoccupaient :

1. La saisie des expressions algébriques avec un clavier et une souris n'allait-elle pas modifier les réponses des élèves et surtout les limiter ?
2. L'analyse des expressions libres des élèves (en particulier sur l'exercice du prestidigitateur que nous présentons par la suite) qui nécessite une grande expertise didactique est-elle possibles de façon automatique ?

La thèse de S. Jean (Jean 2000) et les DEA de J. Provost (1999) et D. Prévité (2002) ont été consacrés à explorer cette hypothèse, travaux que nous présentons dans les trois sections suivantes : tout d'abord nous décrivons le prototype construit puis les retours que nous avons étudiés sur les utilisations de ce prototype, enfin les résultats et les nouvelles questions de recherche suscitées par ces expérimentations.

Dans un deuxième temps, il nous semblait possible de généraliser le travail de thèse de B. Grugeon et de définir des stratégies d'enseignement associées aux profils cognitifs diagnostiqués. Et là encore il nous semblait qu'il était possible de définir des environnements informatiques pour instrumenter ces stratégies. Ce sont les deux hypothèses fondant le projet Lingot sur lequel nous travaillons actuellement.

Le projet Pepite

L'outil de diagnostic papier-crayon s'est révélé trop complexe pour être utilisé par les enseignants dans les classes (Lenfant 1997). Ainsi le premier travail de recherche du projet Pépité a consisté à mettre en œuvre l'idée d'automatiser l'outil de diagnostic papier-crayon. Ce travail avait pour objectif de montrer (Jean et al. 1997, 1999) :

- qu'il était possible à l'aide d'un ordinateur de collecter des données sur les compétences des élèves (à partir de ces données, les experts pourraient construire les profils cognitifs des élèves) ;
- qu'il était possible d'automatiser (au moins partiellement) ce diagnostic ;
- que les profils cognitifs élaborés aideraient les enseignants à prendre des décisions pour leurs élèves.

Pépité est un logiciel disponible gratuitement (<http://pepitem.univ-lemans.fr>). La première version a été réalisée en Delphi par Jean (Jean 2000, Jean-Daubias 2002). Mettant en œuvre la stratégie de diagnostic proposée par B. Grugeon, le logiciel Pépité est constitué de trois modules.

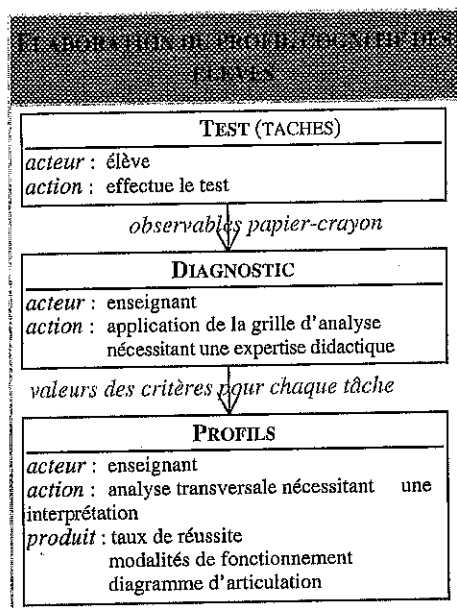


Figure 1 : L'outil de diagnostic papier - crayon.

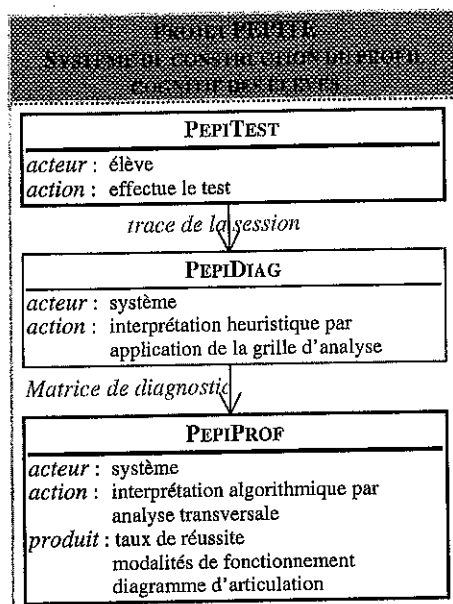


Figure 2 : Architecture de PEPITE.

PépiTest, le logiciel élève

PépiTest est le logiciel destiné aux élèves. Il leur propose de résoudre sur ordinateur 22 exercices inspirés de ceux de l'outil de diagnostic papier-crayon. Il recueille les réponses des élèves aux exercices. Ceux-ci sont constitués de questions fermées (réponses à choix multiples ou de réponse interactives par exemple en cliquant des zones sur un graphique) mais également de questions ouvertes exigeant des élèves la production d'expressions algébriques, de réponses en langage naturel ou de réponses combinant ces deux registres d'expression (nous appelons ce langage le langage « mathurel »). Pour les chercheurs en didactique, il est important que les élèves puissent formuler eux-mêmes leurs réponses dans leurs propres termes pour pouvoir établir un diagnostic conséquent du point de vue didactique, même si cela rend l'analyse automatique très complexe. L'interface du logiciel a été particulièrement soignée. Il est bien entendu crucial pour le diagnostic que les données recueillies permettent de décrire les compétences des élèves et non les problèmes d'utilisabilité de l'interface. En particulier, dès le début, les chercheurs en didactique des mathématiques s'interrogeaient sur les modifications des tâches mathématiques introduites par les difficultés de l'écriture des expressions algébriques sous forme linéaire avec un clavier et une souris. La figure 3 montre une réponse d'un élève à un exercice proposé par PépiTest.

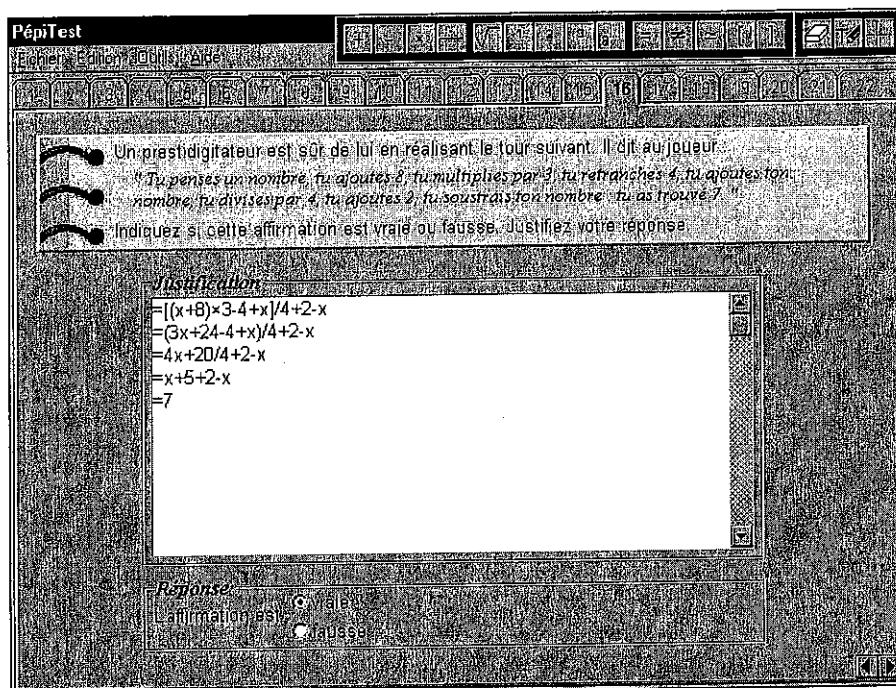


Figure 3 : Les réponses de Laurent à un exercice de PépiTest

PépiDiag, le logiciel de diagnostic automatique

PépiDiag est le module d'analyse des réponses. Il interprète les réponses des élèves à chaque exercice de PépiTest en appliquant des heuristiques dérivées de la grille d'analyse issue de l'analyse didactique. Comme l'outil de diagnostic papier-crayon, il assortit chaque réponse d'élève avec un item de diagnostic. Nous appelons cette opération le codage des réponses des élèves et nous en donnons un exemple à la fin de cette section. Ainsi PépiDiag remplit automatiquement une matrice de diagnostic de 55 lignes correspondant au nombre de questions dans PépiTest et de 36 colonnes correspondant aux différentes composantes décrites dans le modèle multidimensionnel des compétences algébriques. En fait, PépiDiag ne remplit que partiellement cette matrice car nous ne savons pas encore comment coder automatiquement toutes les réponses des élèves. Les réponses fermées et les expressions algébriques sont analysées. Les réponses en langage naturel et les réponses mixtes sont très partiellement analysées par recherche de mots clés. Ainsi 75 % des réponses des élèves sont automatiquement analysées.

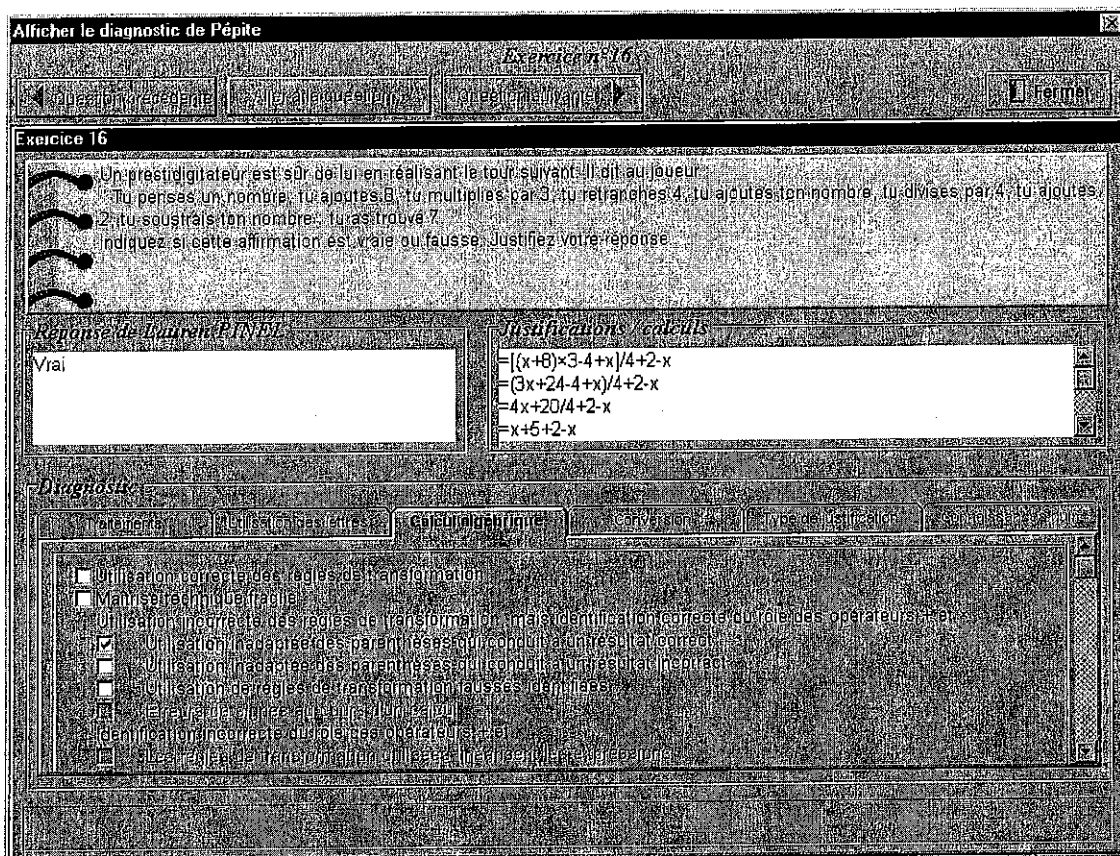


Figure 4: PépiProf, vérification par l'enseignant du codage des réponses de Laurent

PépiProf, le logiciel enseignant

PépiProf est le logiciel destiné aux enseignants. Il établit le profil de l'élève par une analyse transversale de la matrice et le présente au professeur. Il fournit également un module pour modifier le codage des réponses de l'élève (i.e.. pour modifier la matrice de diagnostic sans qu'elle apparaisse sous cette forme à l'enseignant) afin de permettre à l'enseignant de vérifier le codage effectué par le logiciel et de le corriger ou le compléter, si nécessaire. La figure 4 montre l'interface qui permet au professeur de vérifier et éventuellement corriger le diagnostic du logiciel. Dans la réponse de Laurent représentée sur la figure 3, PépiDiag a codé : traitement incorrect, utilisation correcte des lettres, utilisation incorrecte des parenthèses menant à un résultat correct, traduction correcte du langage naturel en expression algébrique, justification par l'algèbre. L'enseignant peut modifier le codage s'il n'est pas d'accord avec le codage automatique. Les figures 5, 6 et 7 montrent les profils affichés par PépiProf avec les trois descriptions du profil de Laurent.

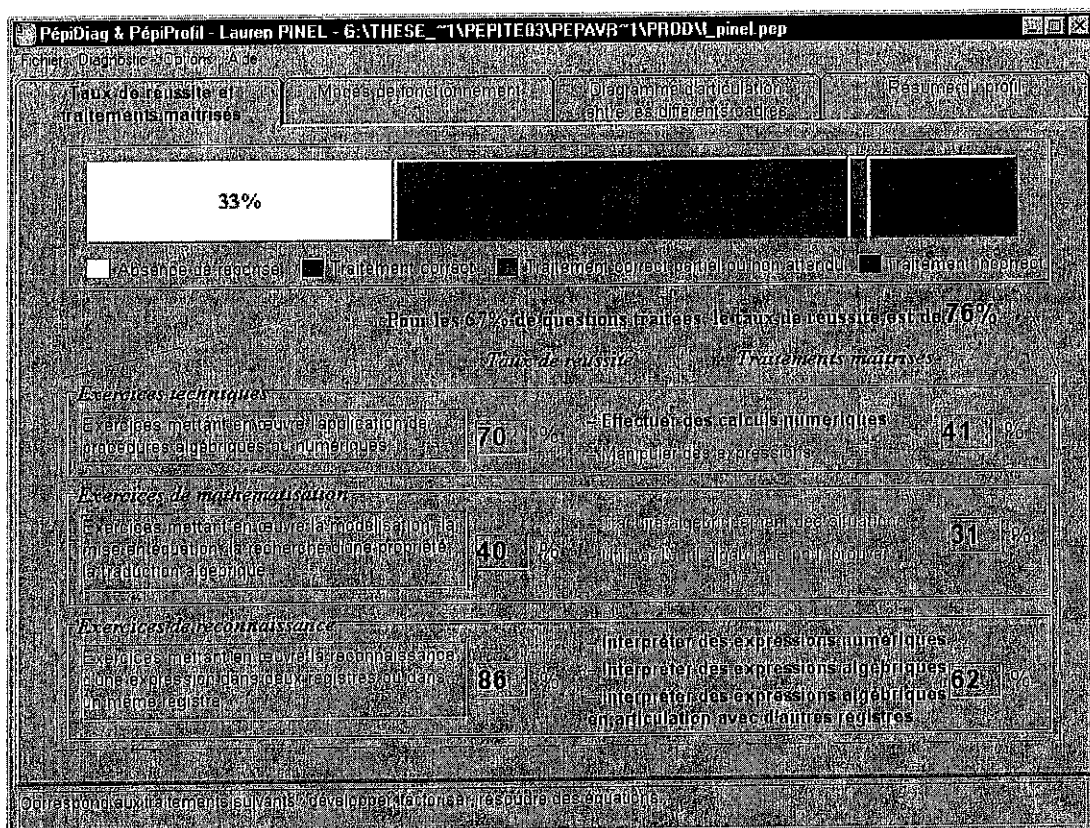


Figure 5 : Description quantitative du profil cognitif de Laurent

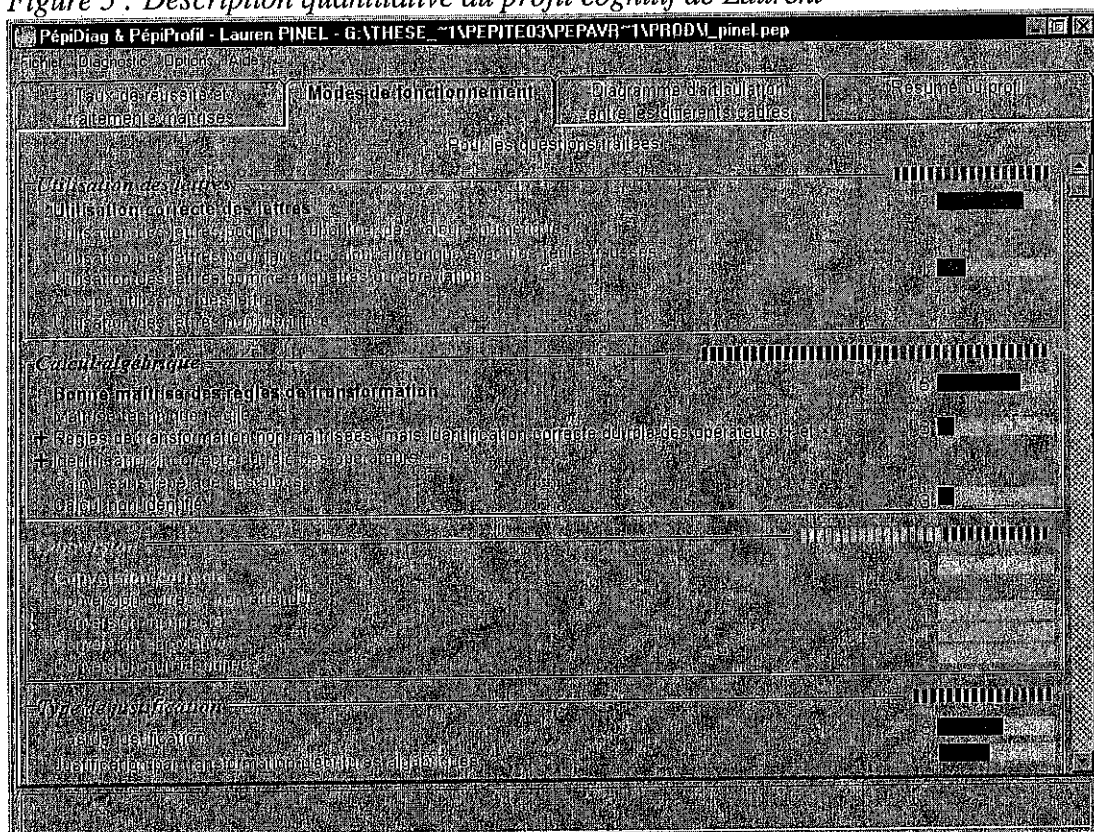


Figure 6 : Description qualitative du profil cognitif de Laurent

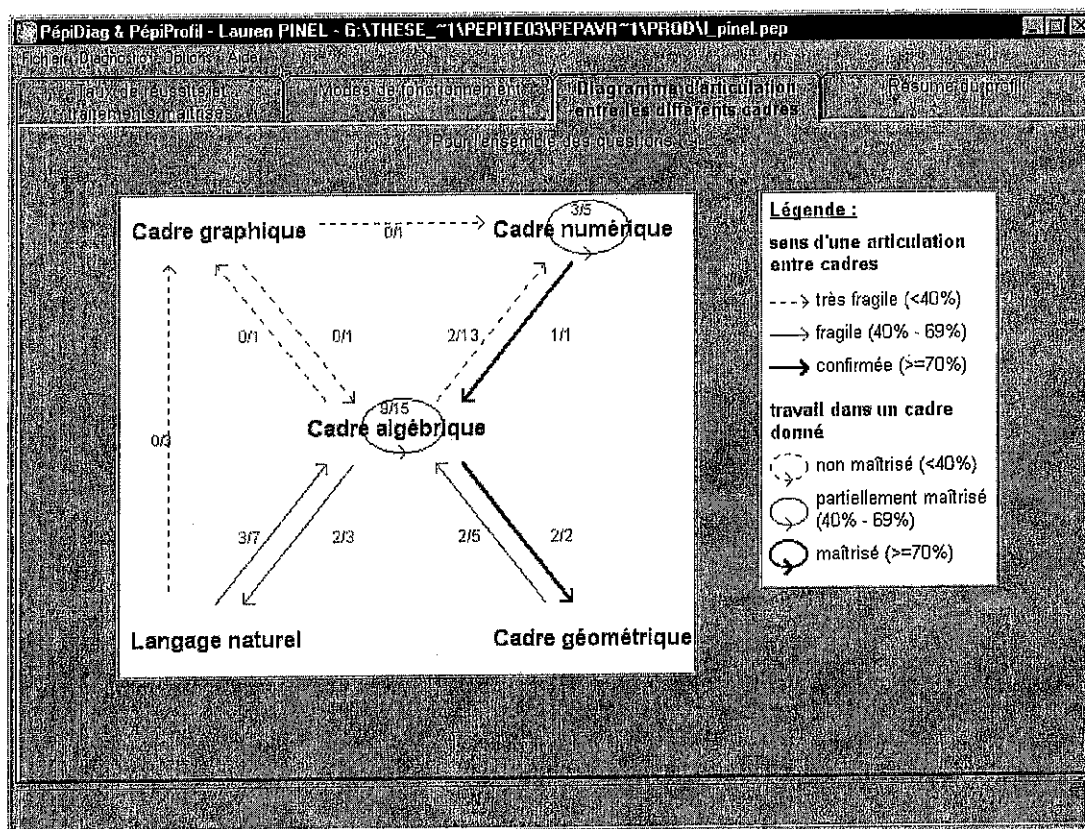


Figure 7 : diagramme d'articulation entre les différents cadres pour le profil de Laurent

Des retours d'usage de Pépite

L'idée de départ du projet Pépite était de tenter d'automatiser (au moins partiellement) un outil de diagnostic papier-crayon construit par des chercheurs en didactique, (Grugeron 1995, Artigue et al. 2001). Par rapport aux logiciels d'évaluation traditionnels, cet outil a deux caractéristiques principales. D'une part, il donne une description qualitative des compétences des élèves et ne se réduit pas à une analyse en terme de réussite/échec ou de listes d'erreurs, d'autre part, si l'analyse de réponses porte en partie sur des questions fermées (QCM) elle traite un grand nombre de réponses à des questions ouvertes. Nous avons conçu et réalisé un prototype appelé Pépite (Jean 2000) dont l'objectif premier était de montrer la faisabilité informatique du projet (Jean et al. 1999). L'objectif second était de disposer d'un prototype qui permette d'observer dans un contexte de classe, si les enseignants pouvaient s'approprier l'outil et comment. Dans cette section nous résumons d'abord les utilisations de Pépite que nous avons étudiées (entre Janvier 2000 et avril 2002) et les leçons que nous en avons tirées.

Différents contextes d'usage

Nous avons observé l'utilisation de Pépite dans différents contextes (Delozanne et al. 2002). D'abord nous avons examiné PepiTest en laboratoire, enregistrant une élève en vidéo. Puis environ 200 élèves en fin de collège ou de seconde ont passé le test dans le cadre de leur enseignement normal de mathématiques. Pépite a été utilisé en atelier par des chercheurs ou des formateurs des enseignants. Il a aussi été utilisé dans la formation initiale ou continue des professeurs (IUFM de Créteil, Amiens, Paris, Rennes, Montpellier). Des sessions pilotes ont été menées avec des enseignants expérimentés volontaires. Enfin quelques enseignants nous

ont rapporté avoir utilisé Pépite en dehors de notre présence. Le tableau 1 synthétise ces contextes.

Contexte	Situation	Utilisateur	Nombre	Données collectées
Test d'élèves	Classe	élèves	200	Réponses d'élèves Questionnaires Observations Rapports
Recherche didactique	Recherche de régularités dans les profils d'élèves	chercheurs	3	Liste de problèmes d'utilisation ou des bogues Définition de classes de profils
Formation de formateurs d'enseignants	Étude d'un élève en algèbre, étude des compétences en algèbre	formateurs	40	Questionnaires
Formation d'enseignants	Étude d'un élève en algèbre, étude des compétences en algèbre	Stagiaires et professeur en responsabilité	100	Questionnaires Observations
Session pilote	Classes (Aide individualisée et évaluation)	Enseignants	4	Observations Rapports Cassettes audio
Utilisations spontanées	Classes	Enseignants	9	Rapports oral ou courriel

Tableau 1 : Les différents contextes d'expérimentation de la version 1 de Pépite

Résultats des études sur l'utilisation de Pépite

Tous ces tests ont mis en évidence plusieurs résultats au niveau de la conception de chacun des trois modules du logiciel et aussi au niveau de l'activité de l'enseignant avec Pépite.

I. PépiTest

PépiTest recueille des données, les réponses des élèves, qui peuvent être ensuite utilisées pour le diagnostic. Premièrement, à partir de ces données, les chercheurs en didactique peuvent appliquer la grille d'analyse et construire « manuellement » le profil cognitif de l'élève. Deuxièmement, si nous considérons les réponses de 50 élèves aux exercices de PépiTest, nous obtenons le spectre des réponses prévues par l'analyse didactique a priori. Cela signifie que le logiciel ne diminue pas l'éventail de réponses repérées par l'analyse a priori papier-crayon. Troisièmement, comme nous l'avions anticipé, les élèves ont rencontré des problèmes pour écrire les expressions algébriques « linéaires » avec clavier-souris mais ces difficultés ne les empêchent pas d'en produire. Quatrièmement, malgré des différences locales, des enseignants expérimentés identifient des cohérences de fonctionnement de leurs élèves comparables à celles identifiées avec l'outil papier-crayon ([Lenfant 1997]). Ces résultats constituent, à notre sens, une première validation de la faisabilité du projet en ce qui concerne le recueil des données sur l'élève (Jean 2000, Jean-Daubias 2002).

Du côté des enseignants dans les sessions pilotes et les utilisations spontanées, les enseignants ont repéré chez certains élèves des compétences ou encore des fragilités qu'ils n'avaient pas remarquées auparavant chez leurs élèves. La raison principale est que PépiTest propose des exercices plus divers que ceux qui sont habituellement proposés dans les classes de

mathématiques. C'est une des raisons pour laquelle les formateurs des enseignants de mathématiques pensent que c'est un outil utile pour aider les enseignants à prendre en compte les différents aspects de la compétence algébrique.

II. PépiDiag

Les utilisations de PépiDiag ont démontré quelques inconsistances dans la grille d'analyse didactique lorsqu'elle est appliquée de façon systématique et sans discernement par le logiciel. Par ailleurs les utilisateurs doivent compléter 25 % du codage des réponses qui ne sont pas analysées et doivent corriger environ 10 % du codage des réponses effectué par PépiDiag.

Le module PépiDiag ne permet pas un diagnostic complètement automatique fiable. Il permet un diagnostic assisté.

III. PépiProf

PépiProf assiste l'enseignant dans deux types de tâches : l'analyse des réponses des élèves au test (le codage) et l'étude des profils des élèves. Le module facilitant l'analyse des réponses des élèves (tâche de codage) s'est révélé adapté et est utilisé sans difficulté majeure par chacune des catégories d'utilisateurs. Il est en particulier apprécié par les enseignants stagiaires et par les formateurs.

- Il donne aux enseignants un cadre pour interpréter les réponses des élèves.
- Il leur permet de comprendre les items du diagnostic quand ils sont présentés dans le contexte d'un exercice et avec les réponses des élèves.

Le module pour travailler sur le profil de l'élève n'a été utilisé que par les chercheurs en didactique des mathématiques. Ils apprécient particulièrement d'accéder aux items du diagnostic de différentes manières : à partir des réponses d'élèves, à partir des items de diagnostic, à partir de la liste de questions liées à ces items. Mais ce module soulève des difficultés pour les enseignants, particulièrement pour les enseignants expérimentés :

- Ils ont des difficultés pour comprendre les items du diagnostic quand ils ne sont pas présentés en contexte (dans un exercice avec les réponses des élèves) lorsqu'ils ne connaissent pas le travail didactique sous-jacent.
- Ce module met en œuvre une expertise didactique qui peut être en contradiction avec des pratiques spontanées de diagnostic.
- Dans l'état actuel du développement de logiciel, aucune stratégie d'enseignement n'est proposée pour faire évoluer le profil cognitif. Les enseignants ne sont donc pas motivés pour s'approprier un profil complexe qu'ils ne peuvent pas exploiter.

IV. Exploitation des utilisations de Pépite en classe par l'enseignant

Nous avons observé plusieurs utilisations spontanées de PepiTest pour mettre en place une activité d'apprentissage et non en tant qu'activité de diagnostic, en particulier pour provoquer des débats en binôme ou en classe entière. Les questionnaires remplis par les enseignants, nous ont apportées d'autres informations.

Les points positifs relevés par les enseignants :

- le logiciel de test propose un large éventail d'exercices ; il donne des idées d'exercices à travailler et de compétences à faire acquérir,
- l'interface du logiciel de test est soignée et esthétique,
- le logiciel « marche » du premier coup comme indiqué sur la notice,
- l'ensemble du logiciel révèle des compétences que les enseignants n'avaient pas remarquées chez des élèves en difficulté et augmente la confiance de l'enseignant dans la réussite de ces élèves (enseignantes confirmées),

- le logiciel aide à comprendre l'esprit des nouveaux programmes de collège en algèbre (1 enseignante confirmée),
- le logiciel introduit une médiation qui permet d'instaurer une relation nouvelle avec l'élève sur ses erreurs (1 enseignante confirmée) et 6 mois après l'utilisation du logiciel : « la relation mise en place avec l'utilisation de Pépite a changé l'ambiance en aide individualisée et le regard que les élèves portaient sur mon expertise »,
- le logiciel apporte un éclairage neuf sur les compétences et « aide à prendre conscience des lacunes des élèves » (enseignant débutant) ;

Les points négatifs :

- des difficultés techniques multiples doivent être surmontées : par exemple pour accéder aux salles informatiques dans certains établissements, pour télécharger et installer le logiciel dans des salles qui ne sont pas reliées au réseau et où tous les disques durs sont verrouillés,
- des difficultés techniques supplémentaires sont liées à l'utilisation du système : pour récupérer les réponses des élèves, bogues, problèmes d'utilisabilité,
- la complexité des profils et du vocabulaire utilisé dans ces profils rend leur usage difficile,
- le test est bien adapté en lycée mais inadapté en collège,
- l'utilisation de Pépite prend trop de temps auprès des élèves et aussi pour l'enseignant,
- le logiciel ne fournit pas encore de conseils pour faire évoluer les élèves une fois que l'on a trouvé ce qui ne va pas,
- les diagnostics automatiques incomplets ou erronés obligent à un travail personnel de l'enseignant conséquent : appropriation du logiciel et de l'analyse didactique, reprise des codages, analyse des profils,
- certains enseignants disent se sentir pris en défaut car ils ne comprennent pas la description des profils, ou ils n'ont pas réussi à manipuler le logiciel ou bien enfin car le logiciel leur retourne des réponses d'élèves comme un miroir déformant de leur enseignement (professeurs de collège).

Ils font également des *suggestions*. Comme outil d'évaluation, les enseignants pensent que Pépite est beaucoup trop coûteux en temps. Ils voudraient pouvoir choisir les exercices. Ils demandent à disposer de plusieurs tests avec différents niveaux (4^e, 3^e, 2nde) afin de pouvoir évaluer l'évolution des apprentissages. La plupart d'entre eux demandent que le logiciel prenne en charge un bilan de compétences à destination de l'élève. En effet il est impossible pour eux de fournir une rétroaction personnelle à chaque élève et il n'est pas viable non plus de faire passer un test sans donner le résultat aux élèves. Certains d'entre eux demandent un profil de la classe au lieu de profils personnels pour organiser les apprentissages en début d'année ou pour créer des groupes de travail. La plupart d'entre eux souhaite qu'on leur propose des stratégies d'enseignement pour faire évoluer les compétences ou pour remédier aux difficultés qui ont été diagnostiquées. Certains ont rapporté que Pépite fait apparaître pour quelques élèves en grandes difficultés des compétences qu'ils n'avaient pas perçues auparavant et cela augmente alors la confiance de l'enseignant dans les chances de succès de l'élève. Pour une enseignante, l'usage de Pépite augmente aussi la confiance des élèves envers sa compétence professionnelle : l'enseignante s'intéresse à eux individuellement et cherche à les comprendre avec des moyens modernes issues de recherches de pointe....

De l'utilisation de Pépite par des chercheurs notons un fait très intéressant : les experts ne pratiquent pas le diagnostic comme ils le décrivent dans la méthode qu'ils ont proposée et qui est mise en application dans Pépite. Ils procèdent à un « diagnostic adaptatif ». Ils regardent les réponses d'élèves à un exercice significatif et, selon la réponse, ils énoncent une hypothèse

générale et vont la confirmer et l'approfondir sur quelques exercices complémentaires. Ainsi lorsqu'ils cherchent à proposer une stratégie de remédiation pour un élève particulier, ils forment leur diagnostic seulement à partir de quelques exercices et non sur le parcours systématique de l'ensemble des exercices du test.

Leçons et questions

Ce travail auprès des enseignants nous a montré la nécessité de travailler sur deux axes :

- concevoir un logiciel adaptable à différentes situations
- étudier et instrumenter l'exploitation d'un tel outil de diagnostic dans la classe.

Définir et caractériser des batteries de tests

En ce qui concerne l'activité des élèves, le modèle de la compétence algébrique nous a permis d'implémenter un logiciel qui recueille des données permettant d'aider les enseignants à identifier les difficultés des élèves en l'algèbre. Même lorsque les enseignants ne connaissent pas le modèle didactique, la manière dont il a été mis en application dans le test et dans le module de codage de PépiProf est bien acceptée et utilisée. Les limitations de ce modèle viennent de ce qu'il est prédéfini et spécifique à un niveau d'étude (fin de collège). Ceci nous amène à de nouvelles questions :

- Est-il possible de définir un modèle des compétences pour chaque niveau scolaire ?
- Comment permettre à des enseignants d'adapter le test à leur pratique de classe ?
Comment déterminer les paramètres ?
- Est-il possible de définir des modèles d'exercices à partir desquels les enseignants pourraient construire leurs propres tests ?
- Est-il possible de définir les modèles diagnostiques liés aux modèles d'exercices pour produire du diagnostic quand un professeur a défini un test ?

Pour ce qui concerne le module diagnostique, nous avons montré qu'il était possible d'automatiser partiellement le diagnostic en mettant en application le modèle de diagnostic de Gurgeon. Deux problèmes se posent.

Diagnostic assisté

Le diagnostic étant dans la version 1 partiel et non complètement fiable, l'enseignant doit compléter et vérifier le diagnostic. Il est important que le logiciel de diagnostic ait la possibilité d'évaluer le degré de confiance du codage produit afin de permettre à l'enseignant de ne vérifier que les codages qui ne sont pas fiables ou pas faits.

- Comment pouvons-nous introduire cette estimation de la fiabilité dans le logiciel de diagnostic ?

Diagnostic automatique

Certaines situations nécessitent un diagnostic automatique : par exemple pour étudier de grands corpus ou fournir un bilan de compétences aux élèves. De plus, contrairement à ce que nous pensions au départ, où il nous semblait que les enseignants n'accepteraient pas qu'un logiciel évalue leurs élèves, ils sont plutôt demandeurs d'un diagnostic automatique à partir du moment où ils ont compris la façon de coder du système. En effet un diagnostic automatique leur permettrait de gagner du temps pour se consacrer à ce qui les intéresse : organiser les apprentissages.

- Les méthodes linguistiques ou statistiques peuvent-elles nous aider pour améliorer et fiabiliser le diagnostic sur les réponses ouvertes en particulier quand les réponses sont en langue naturelle ?

Test systématique ou adaptatif ?

Pour ce qui concerne le système entier, il semble que le modèle de diagnostic proposé par les travaux de B. Grugeon soit trop prescriptif. Nous avons noté que B. Grugeon elle-même emploie un diagnostic adaptatif lié à la réponse des élèves mais également à l'objectif du diagnostic pour définir une stratégie d'enseignement. Ainsi, pour l'analyse ergonomique, le modèle qu'elle a proposé est un modèle de « tâche prévue » et non de « tâche effective ». Ceci explique qu'il soit bien accepté par des débutants mais pas par des experts. Les différences entre les débutants et les experts peuvent être observées aussi dans les termes employés pour décrire le profil de l'élève. Des stratégies de diagnostic adaptatif (i.e. qui posent des exercices différents selon les réponses des élèves) permettraient-elles de mieux modéliser des tâches effectives ?

De plus, un diagnostic adaptatif ne permettrait-il pas de simplifier le diagnostic en proposant un nombre limité d'exercices permettant aux enseignants d'établir un diagnostic rapide qui pourrait être confirmé sur quelques autres exercices ?

A partir de la même analyse didactique, on voit qu'il y a plusieurs méthodes pour diagnostiquer qui sont liées à l'utilisation que l'on veut faire du diagnostic.

- Est-il possible d'identifier plusieurs classes d'utilisations diagnostiques et, pour chaque classe, un logiciel spécifique pour l'instrumenter ?
- Le modèle de compétences des élèves de B. Grugeon est-il assez robuste pour servir de fondement à tous ces logiciels ?
- En particulier, dans ce premier travail, nous nous sommes concentrés sur le transfert sur l'ordinateur des tâches papier-crayon. Comment modifier le modèle pour gérer des tâches algébriques sans équivalent dans le contexte papier-crayon ?

Exploitation du diagnostic

Pour ce qui concerne le logiciel destiné aux enseignants, la seule partie qui a été employée est, en formation, le module de codage des réponses des élèves et la description quantitative du profil (imprimée pour être donnée aux élèves). Nous avons observé beaucoup d'incompréhension sur la description qualitative. Il semble que ce logiciel soit adapté aux chercheurs en didactique et adapté pour des sessions de formation, moins bien adapté aux professeurs qui, dans la gestion courante de la classe, ont besoin d'un profil plus opérationnel, c'est-à-dire associé à des activités pour le faire évoluer.

- Est-il possible de définir des profils types qui donnent un moyen d'associer des stratégies d'apprentissage de l'algèbre à chacun de ces profils ?
- Ces profils peuvent-ils être présentés de façon compréhensible aux enseignants, voire aux élèves ?
- Comment déterminer les stratégies d'apprentissage associées aux profils ?
- Comment concevoir un logiciel pour aider les enseignants à mettre en œuvre ces stratégies ?

Telles sont les questions sur lesquelles nous travaillons actuellement.

Conclusion

Nous revenons sur deux classes de questions posées à la didactique des mathématiques : des questions relatives à la conception des EIAH et leur mise en œuvre informatique, des questions relatives à l'utilisation par des enseignants des EIAH réifiant ces modèles.

Questions relatives à la conception des EIAH et leur mise en œuvre informatique

Ce travail a mis en évidence la nécessité pour la didactique des mathématiques d'engager un travail plus systématique d'étiquetage des variables didactiques pertinentes pour générer et décrire des tâches, supports de classes de situations d'interaction adaptées à des profils d'élèves donnés, et, au-delà, en prenant en compte des caractéristiques de l'activité de l'élève en situation de résolution. Comment déterminer des variables candidates ? Lesquelles retenir ? Ce travail s'avère indispensable pour rendre possible la modélisation informatique.

Questions relatives à l'utilisation par des enseignants des EIAH réifiant ces modèles

Ce travail a mis en évidence encore une fois, les difficultés que pose une intégration efficace de tels EIAH dans l'enseignement des mathématiques, ici de l'algèbre élémentaire. Quelles sont les conditions à mettre en place pour une intégration efficace ? Il a aussi pointé la nécessité de mener des recherches qui sachent articuler l'attention portée à l'activité de l'élève et celle portée aux pratiques enseignantes, à la réalité du travail de l'enseignant dans sa classe, à l'évolution des compétences professionnelles en jeu. Mais alors, quelle prise en compte des pratiques enseignantes dans la conception d'outils pour instrumenter le travail des enseignants ? Quelle exploitation dans la formation professionnelle des enseignants ?

Retour sur les hypothèses de recherche

Le travail de Stéphanie Jean sur le prototype Pépite a montré que l'automatisation au moins partielle de l'outil de diagnostic était possible.

L'analyse des retours d'utilisation a rappelé que l'intégration dans les pratiques enseignantes pose de redoutables problèmes.

Du côté informatique

Il s'agit de rendre le diagnostic plus systématique et paramétrable d'une part pour l'améliorer, le faire évoluer et d'autre part pour ouvrir et étendre le logiciel. Il apparaît aussi qu'il y a plusieurs types de diagnostic selon l'utilisateur, chercheur, formateur, enseignant, élève et selon le diagnostic envisagé, statique ou dynamique, automatique ou assisté.

Du côté didactique

L'expérimentation a confirmé nos attentes. Le diagnostic doit conduire à la proposition pour l'enseignant de tâches d'apprentissage adaptées aux élèves. Et cette attente est bien pointée par les enseignants en formation. Aussi, il est nécessaire de passer à un niveau de description macroscopique des profils d'élèves en algèbre. Pour ceci, nous travaillons à définir des classes de profils à partir d'un regroupement portant sur les cohérences de fonctionnement relatives à trois axes : la mobilisation et l'usage de l'outil algébrique, la capacité d'articuler le cadre algébrique aux autres cadres, la technique algébrique. Nous travaillons également à associer à un élève à la fois sa classe de profils et ses caractéristiques propres (fragilités et leviers).

Nous continuons donc notre recherche dans deux directions :

- Pour les enseignants, il s'agit d'avoir à disposition des stratégies d'enseignement adaptées à chaque élève permettant une meilleure régulation de leur apprentissage et s'appuyant sur des leviers pertinents visant à faire évoluer leur profil en algèbre. Cette demande nécessite donc un travail de recherche sur la définition de stratégies d'apprentissage paramétrées associées des classes de profils.
- Pour les élèves, il s'agit après un test, de leur proposer des informations adaptées au diagnostic. Cela nécessite un travail sur la présentation du diagnostic, les difficultés, les points forts, les pistes de travail adaptées.

Du côté de l'ergonomie

Il s'agit d'envisager des procédures de diagnostic implicites des enseignants expérimentés et de définir des conditions de prises en main et d'utilisation de Pépite en classe. Au-delà, un travail est nécessaire pour mettre en perspective, pour les mêmes enseignants, l'activité « spontanée » de diagnostic, l'approche du logiciel en stage ou de façon autonome et l'activité de diagnostic après usage de Pépite.

Le projet LINGOT

Nous présentons maintenant le projet LINGOT issu du projet PEPITE.

I. Les objectifs

Le projet LINGOT vise en premier lieu à rendre opérationnel le prototype existant PEPITE en systématisant et en modélisant le diagnostic automatique pour en améliorer la fiabilité et la généralité. Cette recherche prend en compte les limites et les apports mis en évidence dans les travaux précédents.

Le second volet du projet correspond à la conception d'environnements logiciels interactifs permettant une meilleure régulation des apprentissages en algèbre via une base de situations d'apprentissage et un outil d'assistance à la sélection de situations en fonction des profils cognitifs diagnostiqués. Deux types de situations sont prévues :

- des situations génériques d'introduction à l'algèbre, en particulier des situations exploitant des leviers, comme celui de la généralisation, sous-représentés dans les pratiques d'enseignement actuelles,
- mais aussi des situations d'intervention didactique ou de remédiation dépendant des profils cognitifs que le diagnostic permet d'identifier..

Dans le troisième volet, il s'agit d'étudier leurs conditions d'intégration dans les pratiques enseignantes pour favoriser l'instrumentation du métier d'enseignant.

En fait, ces logiciels sont vus comme des instruments d'interaction entre enseignement et apprentissage, de médiation entre élèves et enseignants. Il y a donc dans la recherche deux facettes étroitement imbriquées :

- une facette où l'objet d'étude est l'activité de l'élève, analysée via celle des interactions élève / logiciel,
- et une facette qui vise l'instrumentation de l'activité enseignante et où l'objet d'étude, c'est l'enseignant, en formation ou dans sa classe, interagissant avec le logiciel et des données concernant les élèves issues du logiciel, ou avec les élèves travaillant eux-mêmes avec le logiciel.

Considérer simultanément ces deux facettes est une nécessité si l'on veut que l'intégration d'EIAH progresse et, à terme, serve réellement à lutter contre les dysfonctionnements de l'apprentissage et de l'enseignement. De plus, centrer la conception des logiciels sur l'activité c'est placer l'évaluation au centre des préoccupations.

II. Du côté diagnostic

En ce qui concerne le diagnostic, le prototype PEPITE qui existe est un logiciel fermé du point de vue des tâches diagnostiques proposées. Il s'agit maintenant de passer à un logiciel paramétré, fonctionnant sur la base de familles paramétrées de tâches, les paramètres étant ajustables par l'utilisateur en fonction de ses besoins propres (niveau de classe, sous-domaine, ..). Une seconde facette du travail est la modélisation de l'activité de l'enseignant pour

permettre une refonte de l'interface enseignant pour leur faciliter l'interprétation du diagnostic et la sélection de situations adaptées en fonction des profils et des leviers retenus.

III. Du côté des situations d'apprentissage

En ce qui concerne la régulation des apprentissages, l'enjeu est de créer un environnement logiciel interactif LINGOT qui permette la connexion diagnostic – régulation. Pour ceci, il s'agit de modéliser des stratégies de sélection d'exercices en fonction de leviers retenus. Préalablement il est nécessaire d'établir des classes de profils ayant des traits caractéristiques semblables pour d'associer une stratégie d'apprentissage adaptée à chaque profil-type. Il s'agit ensuite de créer des familles des situations d'interaction génériques sur ordinateur mettant en œuvre les différents aspects de la compétence algébrique. Là encore, nous avons l'ambition de travailler en termes de modèles paramétrés de types de tâches, permettant une utilisation flexible de ces ressources.

Le travail a déjà avancé en didactique des mathématiques, aussi bien du côté de la définition des classes de profils comme nous l'avons indiqué plus haut, que sur la définition de familles de situations. En particulier, C. Bardini a travaillé sur la définition automatique de tâches d'association entre une expression algébrique et une phrase en langage naturel. A partir de l'analyse a priori, elle a déterminé les variables didactiques pour engendrer une famille d'expressions auxquelles on peut associer les expressions correspondantes en langage naturel (Bardini 2003).

Des expérimentations ont été menées avec PEPITE, avec des élèves et, cette année, en formation d'enseignants. L'expérimentation se poursuit aussi bien du côté élève que du côté instrumentation de l'enseignant avec une méthodologie plus systématique, pilotant et prenant en compte à la fois la conception et l'évolution des produits logiciels.

Coopération didactique et informatique

Pour conclure, nous jetons un regard sur les quinze années de coopération entre la didactique des mathématiques et l'informatique que nous avons menée. En effet, quinze ans séparent maintenant le projet ELISE du projet LINGOT.

Cette coopération n'a pas été sans rencontrer des difficultés qui ont été essentiellement de deux ordres à savoir, d'une part, la nécessaire mise en perspective de concepts, de références, de thèmes de recherche distincts et, d'autre part, la nécessaire prise en compte de l'exigence de la modélisation qui atténue la finesse de l'analyse didactique.

Au-delà des difficultés rencontrées, les interactions entre ces deux communautés ont permis de nombreux enrichissements. La confrontation des points de vue nous a aidées à préciser des modèles testables et discutables pour pouvoir les implémenter de façon satisfaisante, à poser de nouvelles questions de recherche. Il a été possible d'envisager de nouvelles possibilités offertes par l'EIAH pour instrumenter l'activité enseignante, et au-delà de cette seule instrumentation, contribuer à leur formation professionnelle. De plus, ce travail a permis une certaine dissémination des résultats de recherche dans la communauté enseignante.

Étant particulièrement sensibilisées par les difficultés que pose une intégration efficace des environnements informatiques, cette collaboration nous a convaincues, s'il le fallait encore, de la nécessité de mener des recherches qui sachent articuler l'attention portée à l'élève et à son développement cognitif, la modélisation et le développement informatiques et l'attention portée à l'enseignant, la réalité de son travail, l'évolution de ses compétences professionnelles.

C'est dans cette perspective que nous voulons continuer notre recherche.

Références

- [Artigue 1988] Artigue M., Ingénierie didactique, Recherche en Didactique des Mathématiques, vol 9, n°2, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble, 1988, p. 281-308.
- [Balacheff et Vivet 94] Balacheff & Vivet, Intelligence Artificielle et Didactique des Mathématiques, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble (aussi publié dans Recherches en Didactique des Mathématiques, vol 14 (1/2), 1994, Éditions La Pensée Sauvage).
- [Bardini 2003] Bardini C., The construction of meaning of algebraic symbolism at different school levels. An epistemological and didactical approach, CERME 3: Third Conference of the European Society for Research in Mathematics Education (28 février au 3 mars 2003, à Bellaria, Italie).
- [Bruillard et Vivet 1994] Bruillard E., Vivet M., Concevoir des EIAO pour des situations scolaires : approche méthodologique, in N. Balacheff ET M. Vivet, Didactique et Intelligence Artificielle, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble, 1994, p. 273-302.
- [Bruillard et al. 2000] Bruillard E., Delozanne E., Leroux P., Delannoy P., Dubourg X., Jacoboni P., Lehuen J., Luzzati D., Teutsch P. Quinze ans de recherche sur les sciences et techniques éducatives au LIUM. Education et informatique. Hommage à Martial Vivet. Sciences et Techniques éducatives, vol. 7, n° 1, Hermès Science, p. 87-145.
- [Chevallard 1992] Chevallard Y. : Concepts fondamentaux de la didactique : perspectives apportées par une approche anthropologique. Recherches en Didactique des Mathématiques, Vol 12.1, pp. 73-111, Editions La Pensée Sauvage.
- [Delozanne1994] Delozanne E., Un projet pluridisciplinaire : ELISE, un logiciel pour donner des leçons de méthodes, in Balacheff & Vivet, Intelligence Artificielle et Didactique des Mathématiques, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble (aussi publié dans Recherches en Didactique des Mathématiques, vol 14 (1/2) p. 211-250, 1994, Éditions La Pensée Sauvage).
- [Delozanne et al. 2001] Delozanne E., Jacoboni P. (Eds.), Interaction Homme Machine pour la formation et l'apprentissage humain, numéro spécial de la Revue Sciences et Techniques Éducatives, vol 8-n°3-4/2001, Hermès 239-274
- [Delozanne et al. 2002] Delozanne É., Grugeon B., Jacoboni P., " Analyses de l'activité et IHM pour l'éducation ", In Proceedings of IHM'2002, International Conference Proceedings Series, ACM, 2002, Poitiers, France 25-32
- [Douady 1984] Douady R. (1984) : Dialectique outil/objet et jeux de cadres, Thèse d'état, Université Paris 7.
- [Dubourg et al. 95] Dubourg X., Delozanne E., Grugeon B., Situations d'interaction dans un environnement d'apprentissage : le système Repères, in Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur, coordonné par D. Guin, J.-F. Nicaud, D. Py, Actes des Quatrièmes Journées EIAO de Cachan, Eyrolles, p. 223-244, 1995.
- [formation 2003] <http://maths.creteil.iufm.fr>, formation continue, algèbre
- [Grugeon 1995] Grugeon B., *Etude des rapports institutionnels et des rapports personnels des élèves à l'algèbre élémentaire dans la transition entre deux cycles d'enseignement : BEP et Première G*, Thèse de doctorat, Université Paris VII, décembre 1995.
- [Grugeon 1997] Grugeon B., *Conception et exploitation d'une structure d'analyse multidimensionnelle en algèbre élémentaire*, Revue de Didactique des Mathématiques, Vol. 17, n°2, pp.167-210, 1997.
- [Hasquenoph 1998], Hasquenoph-Bernou B., Analyse des effets de la transposition informatique de tâches en algèbre élémentaire, Mémoire de DEA de didactique des mathématiques, Université Paris VII, 1998.

- [Helander 1997] Helander M., Landauer T., Prabhu P. (eds.), *Handbook of Human Computer Interaction*, Elsevier Science B.V., 1997
- [Iamarène (1998), Iamarène S., Contribution à l'automatisation du repérage du fonctionnement des élèves en algèbre, Mémoire de DEA de didactique des mathématiques, Université Paris VII, 1998.
- [Jean et al. 1999] Jean J., Delozanne E., Jacoboni P. et Grugeon B., A Diagnosis Based on a Qualitative Model of Competence in Elementary Algebra, S. Lajoie & M. Vivet eds, *Proceedings of Artificial Intelligence in Education*, Le Mans July 99, IOS Press, Amsterdam, p. 491-498, 1999.
- [Jean et al. 1997] Jean S., Delozanne E., Jacoboni P. et Grugeon B., *Conception, réalisation et évaluation d'interfaces en EIAO : l'exemple de PEPITE*, Actes des 5^{èmes} journées EIAO de Cachan, Hermès, pp. 37-48, 1997.
- [Jean 2000] Jean S., *Pépité un système d'assistance au diagnostic de compétences*, Thèse de l'Université du Maine, Le Mans, Janvier 2000.
- [Jean-Daubias 2002] Jean-Daubias S., Un système d'assistance au diagnostic de compétences en algèbre élémentaire, in Jean-François Nicaud, Élisabeth Delozanne, Brigitte Grugeon (éditeurs), numéro spécial Environnements informatiques d'apprentissage de l'algèbre, *Revue Sciences et Techniques éducatives*, Hermès, volume 9-n°1-2/2002
- [Kieran, 1992] Kieran C. : The learning and teaching of school algebra. in *Handbook of Research on Mathematics Teaching and Learning*. Douglas A. Grouws (ed), pp. 390-419, New York Macmillan.
- [Koedinger 97] Koedinger K. R., Anderson J. R., *Intelligent Tutoring Goes to School in the Big City*, IJAIED (8), 30-43, 1997.
- [Heffernan et Koedinger 2002] Heffernan N. T., Koedinger K. R., Miss Lindquist un système fondé sur le dialogue pour apprendre à exprimer algébriquement des énoncés en langage naturel, in Jean-François Nicaud, Élisabeth Delozanne, Brigitte Grugeon (éditeurs), numéro spécial Environnements informatiques d'apprentissage de l'algèbre, *Revue Sciences et Techniques éducatives*, Hermès, volume 9-n°1-2/2002, p. 11-36
- [Kolski 2001a] Kolski C. (Ed.) *Analyse et conception de l'IHM, Interaction homme-machine pour les systèmes d'information Vol 1*, Hermès, 2001, 250 p
- [Kolski 2001b] Kolski C. (Ed.) *Environnements évolués et évaluation de l'IHM, Interaction homme-machine pour les systèmes d'information Vol 2*, Hermès, 2001, 250 p
- [Lenfant 1997] Lenfant A., *Étude sur la transposition d'un outil de recherche destiné aux enseignants*, Mémoire de DEA de didactique des mathématiques, Université Paris 7
- [Leroux 1995] Leroux P., *Conception et réalisation d'un système coopératif d'apprentissage - Étude d'une double coopération : maître/ordinateur et ordinateur/groupe d'apprenants*, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, spécialité Informatique, 1995
- [Mackay 97] Mackay W., Fayard A.-L., « *Radicalement nouveau et néanmoins familier : les strips papiers revus par la réalité augmentée* », *Actes IHM'97 : Neuvièmes Journées sur l'Interaction Homme-Machine*, Poitiers, France: Cépaduès Editions.
- [Nardi 96] Bonnie A. Nardi (Ed), *Context and Consciousness : Activity Theory and Human Computer Interaction*, Massachusetts Institute of Technology, 1996, réédité en 1997, 400 p.
- [Péna 2003] Péna J. C., *Conception et réalisation d'une interface d'assistance au diagnostic : PepiProf-Java*, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, septembre 2003.
- [Previt 2002] Prévité D., *Vers un diagnostic de compétences inspectable par différents types d'utilisateurs*, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, 2002

- [Provost J. 1999] Provost J., PépiProfil, un outil utilisable par les enseignants pour la gestion de classe, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine.
- [pepite 2003] <http://pepite.univ-lemans.fr>
- [Rogalski 94] Rogalski M., Les concepts de l'EIAO sont-ils indépendants du domaine ? L'exemple de l'enseignement de méthodes en analyse, Balacheff & Vivet, Intelligence Artificielle et Didactique des Mathématiques, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble (aussi publié dans Recherches en Didactique des Mathématiques, vol 14 (1/2) p. 43-66, 1994, Éditions La Pensée Sauvage).
- [Sfard 1991] Sfard A.: On the dual nature of mathematics conceptions : Reflections on processes and objects as different sides of the same coin. *Educational Studies in Mathematics*, Vol. 22, pp. 1-36.
- [Stacey et al. 2003] Stacey K., Jennifer Flynn Evaluating an adaptive computer system for teaching about decimals: Two cases studies in Élisabeth Delozanne, Kaye Stacey (eds), Workshop Advanced Technologies for Mathematics Education, Proceedings of Artificial Intelligence in Education, Sydney, July 2003, IOS Press, Amsterdam
- [Vergnaud 1990] Vergnaud G. (1990 a) : La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol 10/1.2, pp. 133-170, Editions La Pensée Sauvage.
- [Vivet et al. 1994] Vivet. M., E. Bruillard Concevoir des EIAO pour des situations scolaires : approche méthodologique, in N. Balacheff et M. Vivet, Didactique et Intelligence Artificielle, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble, 1994, p. 273-302.