

DOSSIER SCIENTIFIQUE

Titre : Modélisation et mise en œuvre d'environnements informatiques pour la régulation de l'apprentissage, le cas de l'algèbre avec le projet LINGOT

1. Situation actuelle du projet

Contexte et enjeux éducatifs

L'étude des apprentissages au sein de l'institution scolaire est indissociable de l'étude de l'enseignement dispensé. Dans le cadre d'une amélioration de la qualité de l'enseignement, nous voulons accompagner les changements dans le métier d'enseignant par la mise à disposition d'outils performants qui assistent les enseignants dans les nouvelles tâches qui leur sont confiées (enseignement sur mesure, gestion de l'hétérogénéité des classes, aide individualisée aux élèves). En particulier, les textes ministériels et de nombreux travaux scientifiques tant en didactique qu'en sciences de l'éducation et en psychologie cognitive, mettent en lumière la nécessité d'une analyse fine des productions des élèves pour comprendre leurs modes de fonctionnement et pouvoir agir de façon efficace sur l'apprentissage. Ce travail reste encore trop en marge du domaine d'action des enseignants. En effet, c'est un travail qui nécessite une expertise encore en cours d'élaboration dans les laboratoires de recherche en sciences de l'éducation et en didactique. Les résultats commencent à se diffuser en France par le biais des IUFM notamment. Mais cette diffusion est très lente à notre avis pour deux raisons majeures. Tout d'abord les résultats de la recherche sont partiels et pas d'entrée opérationnels (Artigue 2001), leur mise en œuvre impose aux enseignants une charge de travail impossible à assumer dans les conditions habituelles d'exercice de leur métier. De plus, ce travail nécessite un regard sur le métier d'enseignant et une formation à la didactique qui sont encore très peu répandus dans l'institution scolaire, et ceci aussi bien en France qu'à l'étranger.

Dans ce contexte, nous faisons l'hypothèse que la mise à disposition d'outils informatiques d'assistance à l'activité des enseignants contribuera à rendre opérationnelles des recherches en sciences humaines et à favoriser la diffusion de leurs résultats dans le corps social. L'instrumentation informatique de l'activité d'enseignant nous paraît un enjeu de société important en particulier en ce qui concerne la compréhension par les enseignants des difficultés rencontrées par leurs élèves en proposant une interprétation des compétences (correctes ou non) qu'ont développées leurs élèves dans le but de déterminer des leviers permettant de faire évoluer ces compétences et de proposer des situations d'apprentissage adaptées au profil cognitif de chaque apprenant. Cependant si, potentiellement, l'introduction d'outils informatiques peut améliorer la qualité de l'enseignement et de l'apprentissage, de nombreux auteurs ont mis en évidence qu'elle introduit également une complexité nouvelle tant pour les enseignants que pour les élèves et modifie en profondeur tant les situations d'apprentissage que les savoirs en jeu.

Par ailleurs, les interactions avec un système informatique conçues à des fins d'apprentissage ou d'enseignement fournissent des corpus numérisés qui constituent une mine de données pour des chercheurs en sciences cognitives. Nous faisons une seconde hypothèse à savoir que la création de prototypes informatiques avancés permet des expérimentations qui aident à tester des hypothèses et faire surgir de nouvelles thématiques de recherche.

Nous proposons donc un travail de recherche 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 études cognitives, épistémologiques, anthropologiques et ergonomiques 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, compléter, systématiser ou infléchir les études de départ.

De notre point de vue, une telle synergie entre recherche fondamentale en sciences humaines et en informatique, expérimentation et confrontation des résultats de la recherche sur le terrain est un des axes permettant à la fois d'infléchir les pratiques au sein de l'institution scolaire et d'enrichir l'étude des processus d'apprentissage en faisant surgir de nouvelles questions.

Pour développer notre recherche, nous avons choisi un domaine d'apprentissage, celui de l'algèbre à la fin de la scolarité obligatoire. Comme outil privilégié des mathématiques, l'algèbre constitue un verrou d'accès à l'enseignement scientifique supérieur. L'étude des difficultés des élèves et la création d'outils pour améliorer cet apprentissage est donc d'un intérêt social évident et permet d'établir des relations entre mathématiques et d'autres sciences.

Cet appel d'offres Cognitique nous donne l'opportunité de développer en parallèle et de façon interactive des recherches cognitives et didactiques ainsi que des recherches en informatique et en ergonomie cognitive.

Contexte scientifique

Dans la communauté informatique et en particulier dans le domaine qui s'appelle maintenant EIAH en France et Artificial Intelligence and Education (AI&ED) la modélisation des connaissances des élèves est un thème de recherche important tant dans la communauté internationale que dans les recherches francophones. Depuis quelques années ces recherches sont menées dans des équipes pluridisciplinaires et s'appuient assez souvent sur l'utilisation de dispositifs informatiques (Balacheff et Vivet 1994, Lajoie et Vivet 1999, Grandbastien et Bruillard 2000) L'algèbre en tant que langage formel a été un sujet assez souvent étudié (Nicaud, Delozanne et Grugeon 2002). Les chercheurs se sont cependant souvent limités à des études très restreintes pour faire face à la complexité des modélisations. Par exemple Koedinger et Anderson (1997) ont conçu un environnement informatique qui propose plusieurs représentations aux étudiants pour les aider à modéliser puis résoudre des problèmes de la vie courante. Nicaud (1994) travaille sur la modélisation des règles de calcul algébrique et a conçu un environnement d'apprentissage fondé sur ce travail de modélisation. Hefferman (2000) s'intéresse à la modélisation sous forme de relation du premier degré d'énoncés en langue naturelle. Cerruli et Mariotti (2002) étudient la transformation d'expressions équivalentes par application d'axiomes. Le système mis en place par Beeson (2002) traite un large panel d'exercices mais se cantonne à des problèmes de calcul algébrique. Ces travaux, ainsi que d'autres dans des domaines différents de l'algèbre (par exemple Van Lehn(1997)) modélisent les connaissances de l'étudiant en terme de réussite et d'échecs en les comparant par rapport à la connaissance de référence et en recensant les principales erreurs. Notre approche est assez différente puisque nous essayons de repérer et de décrire des cohérences de fonctionnement qui nous permettent d'appréhender la complexité de la compétence des élèves, pas seulement en termes d'erreurs, mais en terme de compétence correcte, partielle, inadaptée) dans toutes ses dimensions afin de trouver des leviers sur lesquels s'appuyer pour faire évoluer la compétence construite.

Du côté de la didactique des mathématiques ou de "mathematical educational research", des cadres théoriques ont été élaborés qui permettent d'interpréter les comportements des élèves et de mieux comprendre la complexité des processus cognitifs à l'œuvre dans la construction des connaissances. Nous organisons l'analyse de la compétence algébrique autour de deux éléments principaux : les deux dimensions *outil* et *objet* de l'algèbre élémentaire, termes pris selon l'acception de Douady(1985), ces deux dimensions étant non indépendantes et non hiérarchisés, et la nécessaire rupture épistémologique entre l'arithmétique et l'algèbre (Kieran 1992).

En ce qui concerne la dimension outil, la compétence algébrique s'évalue à travers la capacité à produire des expressions algébriques et des relations pour traduire des situations, à les interpréter puis à mobiliser des outils algébriques adéquats à leur résolution. Différents types de problèmes mettent en jeu cette dimension, par exemple, pour prouver des propriétés numériques, modéliser des situations, étudier des fonctions.

En ce qui concerne la dimension objet, au delà du statut accordé aux objets (Sfard A. et Linchevski L. 1994), il est nécessaire de prendre en compte le double aspect syntaxique et sémantique des expressions algébriques pour les manipuler formellement en redonnant sa juste place à la dimension technique du traitement algébrique (Drouhard 1992, Arzarello 1993). De plus, il s'agit de prendre en compte la dimension sémiotique du travail algébrique qui met en jeu les rapports entre le registre des écritures algébriques et les différents registres sémiotiques, plus particulièrement le registre du langage naturel (Duval 1996).

Nous nous attachons à prendre en compte ces diverses dimensions pour décrire la complexité des processus d'apprentissage.

Devant la difficulté de cette tâche nous proposons, non pas un système de diagnostic automatique ou un tuteur intelligent, mais des outils qui assistent l'enseignant dans son travail. Cette approche qui a été développée au LIUM par Vivet (1990) et Leroux (1995) et qui réintègre le maître dans la situation d'apprentissage nous semble indispensable dans une perspective d'intégration des technologies de la cognition dans le système éducatif. Dans cette perspective nous nous appuyons sur les travaux de recherche en Interaction Homme-Machine, concernant la modélisation de l'interaction et l'ingénierie des interfaces. Les études didactiques très pointues sur lesquelles nous nous appuyons nous permettent d'avoir une modélisation de l'interaction des élèves et des logiciels. Du côté enseignant, nos travaux nous conduisent à concevoir des logiciels dont l'usage n'existe pas encore et donc à travailler la question de l'instrumentation lors de l'introduction de ces logiciels dans les classes. Les travaux en ergonomie cognitive de Rabardel (1995) nous semblent tout à fait pertinents pour étudier, du point de vue cognitif, ces problèmes liés à l'instrumentation de l'activité d'enseignant par des dispositifs techniques complexes. C'est pourquoi nous souhaitons élargir notre équipe à des chercheurs en ergonomie cognitive.

Travaux et publications des partenaires du projet dans ce domaine

Le groupe EIAH et Mathématiques du *LIUM* et *l'équipe DIDIREM* de Paris 7 ont depuis une dizaine d'années mis en œuvre une synergie et acquis une expérience reconnue de travail interdisciplinaire. Elles souhaitent maintenant étendre leur coopération à d'autres laboratoires pour élargir leurs perspectives de recherche et d'expérimentation. Elles s'attachent à concevoir, réaliser et valider des systèmes destinés à favoriser les apprentissages humains :

- le projet ELISE : enseignement de méthodes intégré dans un dispositif d'enseignement sur mesure en DEUG (domaine du calcul de primitives)
- le projet REPERES : modélisation de l'interaction en EIAO (domaine des équations de droites)
- le projet PÉPITE : diagnostic de compétences (domaine de l'algèbre élémentaire)
- le projet AMICO : dialogue avec des compagnons virtuels pour prouver des propriétés mathématiques en utilisant différents registres sémiotiques.

Ces projets qui ont donné lieu à 5 thèses, à des stages de DEA dans les deux disciplines et à des publications (communes et aussi spécifiques à chacune des disciplines concernées), s'appuient tous d'une part sur des études didactiques, épistémologiques et cognitives et, d'autre part, sur des modélisations informatiques construites dans des démarches itératives de conception alliant réflexion théorique, modélisation, réalisation et tests sur le terrain.

Ces expériences passées poussent ces deux équipes à élargir leur collaboration dans trois directions :

- en direction des IUFM pour travailler dans le champ de la formation des enseignants et avoir un large champ d'expérimentation en contexte des modèles mis au point,
- en direction de l'ergonomie cognitive pour étudier les conditions d'appropriation des logiciels par les enseignants ainsi que les conséquences des situations d'usage (Bruillard et al. 2000) sur la conception des logiciels.

Le projet LINGOT que nous présentons ici s'appuie ainsi sur un *travail en didactique des mathématiques* Grugeon (1995). À partir d'une synthèse des différents travaux en didactique des mathématiques et d'une étude sur une longue période de l'activité algébrique des élèves, elle y proposait un modèle multidimensionnel de la compétence algébrique dans l'enseignement secondaire et un outil de diagnostic papier crayon permettant de situer la compétence acquise par les élèves en référence à ce modèle. La compétence algébrique et les difficultés des élèves sont analysées avec trois points d'entrée : les types de problèmes à résoudre (problèmes arithmétiques, problèmes de généralisation et de preuve, problèmes de modélisation etc.), les objets de l'algèbre (en particulier, usage des lettres, interprétation et production des expressions algébriques, les manipulations formelles (aspects syntaxique, technique, sémantique et sémiotique). L'objectif de ce diagnostic est de proposer ensuite des activités d'apprentissage et de remédiation adaptées. Une modélisation des compétences d'un élève à l'aide de trois types de description a été ainsi proposée : une description globale quantitative du fonctionnement algébrique de l'élève exprimée en termes de taux de réussite par rapport à un niveau attendu, une description qualitative du fonctionnement algébrique exprimée en termes de cohérences de fonctionnement (adéquat ou non) relatives à chaque composante d'analyse (usage des lettres, type de traduction, type de rationalité, type de manipulation formelle, sens accordé au signe d'égalité), une vision globale des articulations entre le registre algébrique et les autres registres sémiotiques exprimée par un diagramme d'articulation. Ce travail de thèse a donné lieu à des publications en Didactique, à des stages de DEA de didactique et à des stages de maîtrise d'Informatique pour une première modélisation. Il a par ailleurs donné lieu à des expérimentations sur le terrain qui ont montré à la fois son intérêt et la difficulté de sa mise en œuvre par les enseignants dans la pratique courante des classes.

Un second travail a ensuite été mené dans le cadre du projet PEPITE, PHASE 1, pour construire un système informatique d'assistance au diagnostic fondé sur le travail de Brigitte Grugeon. Dans le cadre d'une thèse en Informatique, Stéphanie Jean (2000) a prouvé qu'il était possible d'automatiser en partie cet outil afin de rendre opérationnel ce travail de recherche en didactique. Cette thèse a conduit à la réalisation d'un logiciel, lui aussi appelé Pépité, qui permet de faire passer sur machine des tests aux élèves, qui analyse les productions des élèves et propose au professeur un profil cognitif de chaque élève. Le professeur peut compléter et modifier ce profil. Ce logiciel est téléchargeable sur le web (<http://pepите.univ-lemans.fr>) et a été expérimenté auprès de deux cents élèves et auprès d'une cinquantaine d'enseignants de mathématiques.

Ce travail de thèse en Informatique a donné lieu à des publications et à des stages de DEA en Informatique et en Didactique. Le prototype logiciel est utilisé pour des formations d'enseignants et à titre expérimental par des enseignants participant à des recherches dans le cadre du projet. Ces utilisations ont fait apparaître certains dysfonctionnements et de nouveaux problèmes de recherche.

Ces travaux interdisciplinaires ont prouvé l'intérêt pour chaque discipline de confronter ses problématiques, ses concepts et ses méthodes à ceux des autres disciplines et de confronter ces résultats de recherches à des situations "écologiques".

Du point de vue des sciences cognitives, ces travaux ont fait évoluer le modèle initial. D'une part l'exigence de formalisation a conduit à une systématisation et à une restructuration partielle mais

importante des dimensions prises en compte dans le modèle. D'autre part, l'utilisation de l'ordinateur a modifié le comportement des élèves (et en élargissant l'éventail des tâches ce phénomène pourrait être amplifié) sans modifier la cohérence globale du profil de compétence. Une étude systématique des corpus électroniques obtenus lors des expérimentations devraient permettre de compléter la première modélisation.

Du point de vue informatique l'apport principal de ce travail a été d'aborder différemment le diagnostic pour modéliser les connaissances de l'élève. Au lieu de se cantonner à des domaines étroits pour pouvoir appliquer les techniques usuelles de l'IA, nous développons une interaction avec l'utilisateur pour compléter le diagnostic. L'apport a concerné également les méthodologies de conception pluridisciplinaire et de validation de systèmes destinés à favoriser les apprentissages. Un modèle de situations d'interaction a été élaboré qui fait converger d'une part des méthodes issues des travaux en communication homme/machine (Conception Centrée Utilisateur, Conception participative, prise en compte de la logique d'utilisation et des phénomènes de co-adaptation des instruments et des utilisateurs, analyse de tâches et de l'activité, importance du contexte et de la situation) et, d'autre part, des méthodes issues de l'ingénierie didactique (analyse cognitive et épistémologique du domaine et des activités, méthodologies d'expérimentation et de validation). Les interrogations venant des sciences de l'éducation pousse l'informatique à proposer de nouveaux systèmes de représentations des connaissances et de nouvelles situations d'interaction Personne-Machine ou d'interaction Homme-Homme médiatisées par la machine. C'est dans cette optique que nous avons déjà conduit le projet PEPITE et qu'avec une équipe élargie, nous proposons le projet LINGOT.

Publications du demandeur et des partenaires sur le sujet

(Cf. annexe 1)

2. Description du projet

Le projet Lingot est un projet interdisciplinaire qui se situe dans le domaine de recherche sur les EIAH (Environnements Informatiques d'Apprentissage Humain). L'objectif est de concevoir et de mettre en œuvre des situations d'apprentissage de l'algèbre dans le cadre de la scolarité obligatoire incluant l'utilisation d'environnements informatiques. Il s'agit de permettre d'une part aux enseignants de prendre en compte la diversité cognitive des élèves pour réguler les apprentissages en opérationnalisant des résultats récents de recherche en didactique des mathématiques et, d'autre part, de fournir aux chercheurs des outils d'observation systématique permettant d'étudier sur le long terme, les effets sur l'apprentissage des enseignements dispensés. Cet appel d'offres Cognitique nous donne l'occasion de consolider des synergies déjà productives entre des laboratoires universitaires d'informatique (LIUM) et de didactique des disciplines (DIDIREM) mais aussi de les étendre à des équipes d'ergonomie cognitive (EC&AF) et de pédagogues en IUFM (Créteil et Amiens).

L'idée fondatrice du projet consiste à s'appuyer sur un modèle multidimensionnel de la compétence algébrique à la fin de la scolarité obligatoire pour, d'une part, analyser sur le long terme l'enseignement dispensé aux élèves dans les différentes institutions (collège, lycées professionnels, lycées) et, d'autre part, construire pour chaque élève, un profil cognitif permettant de situer les compétences qu'il a construites au cours de sa scolarité par rapport aux compétences que l'institution scolaire estime exigibles à ce niveau d'étude.

À partir de ces analyses, les équipes membres du projet élaborent des situations d'apprentissage soit pour introduire de nouveaux concepts soit pour faire évoluer les profils cognitifs vers les capacités attendues par l'institution. Il s'agit de prendre en compte la question de la différenciation des apprentissages, question cruciale de l'enseignement en particulier en ce qui concerne les élèves en difficulté.

La *métaphore* est d'aller trouver dans le fonctionnement des élèves les granules de connaissances (les PEPITES) sur lesquels s'appuyer pour leur permettre de construire des connaissances nouvelles (les LINGOTS) en leur proposant des activités d'apprentissage adaptées aux compétences qu'ils ont préalablement construites lors de leurs études, que ces compétences soient ou non les compétences de référence de l'institution scolaire.

Objectifs scientifiques

Le projet comporte ainsi trois axes : un axe diagnostique des compétences, un axe apprentissage et un axe instrumentation de l'activité des enseignants de mathématiques. Ces trois axes s'intègrent dans la problématique générale d'activité instrumentée qui interroge aussi bien l'informatique que la didactique des mathématiques, la psychologie, l'ergonomie cognitive et les sciences de l'éducation. Notre objectif est de traiter simultanément plusieurs niveaux de modélisation :

Du côté des systèmes humains :

- Une modélisation de la compétence algébrique élaborée sur la base d'une approche épistémologique, cognitive et anthropologique (B. Grugeon, thèse en didactique des mathématiques de l'Université Paris 7, 1995). La compétence algébrique et les difficultés des élèves sont analysées avec trois points d'entrée : les types de problèmes à résoudre, les objets de l'algèbre, les manipulations formelles mises en jeu (Cf. le paragraphe Contexte scientifique)
- Une modélisation des compétences d'un élève à l'aide de trois types de description : une description globale quantitative du fonctionnement algébrique de l'élève exprimée en termes de taux de réussite par rapport à un niveau attendu, une description qualitative du fonctionnement algébrique exprimée en termes de cohérences de fonctionnement (adéquat ou non) relatives à chaque composante d'analyse, une vision globale des articulations entre le registre algébrique et les autres registres sémiotiques exprimée par un diagramme d'articulation (Cf. le paragraphe Contexte scientifique)

Du côté des systèmes informatiques :

- Une modélisation des activités proposées aux élèves (que ce soit dans un but de diagnostic ou d'apprentissage) dans le double objectif de fiabiliser le diagnostic et de permettre la génération des activités par le système informatique à partir de modèles prédéfinis paramétrables par les enseignants ou par les chercheurs.
- Une modélisation du comportement d'un élève artificiel associé à des profils-types de compétence pour générer des compagnons virtuels.

Notons que ces modélisations ne sont pas forcément consécutives mais s'inscrivent dans un cycle de développement en spirale. Nous partons d'analyses épistémologique, cognitive et anthropologique pour bâtir un premier modèle qui donne lieu à un prototype informatique. Ce prototype est testé d'abord en laboratoire puis dans des classes. Les observations et les protocoles numérisés sont étudiés et permettent d'affiner, de systématiser et de généraliser les premiers modèles.

Voici les trois axes de recherche :

Axe 1 : Diagnostic des compétences de l'élèves

Il s'agit de la poursuite du projet Pépité. Les expérimentations menées pendant l'année 2001-2002 sur l'utilisation de la première version de Pépité ont fait apparaître plusieurs thèmes de recherche :

- la définition de profils types dans le but d'associer à chacun de ces profils des propositions d'activités de remédiation
- la modélisation des exercices de diagnostic pour d'une part fiabiliser le diagnostic et d'autre part permettre à l'enseignant d'adapter le test et le diagnostic à son contexte d'enseignement

- l'élaboration, la présentation et la discussion des profils de compétences à plusieurs types d'utilisateurs (chercheur, professeur de mathématiques, élèves, parents d'élèves) en étudiant, en particulier, en quoi le questionnement des élèves sur leur propre compétence peut être bénéfique pour l'apprentissage

A DIDIREM dans le cadre de la préparation d'une thèse en didactique de mathématiques de Laurent Souchard, Caroline Bardini, Michèle Artigue et Brigitte Grugeon travailleront sur :

- la définition des profils et la recherche de stratégies d'élaboration des profils économiques ainsi que la définition de situations de remédiation
- l'étude de la robustesse du test diagnostique : passation du diagnostic à grande échelle pour recueillir et analyser les données et réinterroger le diagnostic

Au LIUM dans le cadre de la préparation d'une thèse en informatique de Dominique Prévit, Elisabeth Delozanne et Pierre Jacoboni travailleront sur:

- modélisation informatique : systématisation et modélisation du diagnostic automatique pour améliorer sa fiabilité
- présentation et appropriation des profils cognitifs pour plusieurs types d'utilisateurs : chercheur, enseignants et élèves
 - modélisation de l'activité des enseignants : refonte de l'interface enseignant pour prendre en compte les résultats des expérimentations et la fonder sur une analyse de l'activité des enseignants
 - profils pour les élèves : un double travail sera mené pour, d'une part, déterminer au niveau didactique les explications à donner aux élèves sur leurs compétences correctes et incorrectes et sur les questionnements à engager et pour, d'autre part construire un logiciel capable de donner ces explication et susciter ces questionnements.

Les expérimentations que nous avons menées auprès des enseignants et des experts didacticiens montrent que dans une phase d'appropriation de l'expertise didactique, les utilisateurs suivent la démarche systématique proposée par le logiciel. Par contre pour prendre des décisions rapides ils simplifient le diagnostic et ne s'intéressent qu'à un nombre très limité d'exercices clés et ils établissent un diagnostic rapide qu'ils confirment ou affinent sur trois ou quatre autres exercices qu'ils choisissent en fonction de leur hypothèse diagnostic. Ceci suggère de faire différents types de diagnostic selon l'utilisateur et l'utilisation prévue. Un diagnostic dynamique et rapide pour des décisions rapides et un test complet pour une compréhension fine des difficultés des élèves. Dans ce cas, l'analyse de réponses ouvertes n'est pas envisagée de façon compléter dans un avenir proche. L'idée est de demander à l'utilisateur de travailler avec le logiciel pour caractériser la réponse. Cette approche que nous avons déjà retenue pour l'enseignant sera étendue à l'élève et l'on cherchera à instaurer un dialogue avec l'élève pour l'inciter à réfléchir sur ses compétences.

Axe 2 : Activités d'apprentissage

Côté élève

Du côté didactique, il s'agit de définir des situations indexées sur les profils d'élèves. D'une part, les trois niveaux de description des profils mettent à disposition différents types de levier sur lesquels il est possible d'agir pour faire évoluer les compétences des élèves.

D'autre part, il est possible d'associer à chaque situation une grille descriptive décrivant les différents aspects de la compétence algébrique mis en jeu par la situation ainsi que des paramètres plus globaux.

Du côté informatique, il s'agit de modéliser des stratégies de sélection d'exercices à partir de leur grille descriptive en fonction de leviers retenus. Il s'agit de créer des situations d'interaction sur

ordinateur mettant en œuvre les différents aspects de la compétence algébrique (mécano d'expressions algébriques, décodage des écritures, mise en correspondance de différents registres sémiotiques, activités de modélisation, preuve et argumentation etc.). Certaines activités peuvent être transposées d'activités déjà proposées par les enseignants dans les classes. Il s'agit alors d'étudier les effets réducteurs et producteurs de ces nouvelles situations par rapport aux situations papier-crayon dans l'activité mathématique des élèves. D'autres situations sont à inventer en utilisant les apports spécifiques de l'ordinateur (interactivité, simulation, visualisation de phénomènes dynamiques, activités collaboratives).

Un composant de la recherche pourrait viser à définir les propriétés d'un système informatique orienté vers une activité de questionnement de la part de l'élève. L'importance de cette activité de questionnement a été soulignée il y a longtemps par Clancey, mettant en parallèle les acquisitions de connaissances du cognicien questionnant un expert dans une situation d'"extraction de connaissances" et celles visées par les logiciels d'apprentissage (en l'occurrence il s'agissait de MYCIN), et montrant que le questionnement actif était au moins autant producteur de connaissance que la lecture d'explications. On retrouve des résultats de cet ordre dans des recherches concernant directement ou indirectement l'apprentissage auto-régulé (*self-regulated learning*, Boekaerts, 1997, 1999). Les résultats d'une recherche présentée par Chi (2001) sur le tutorat humain montrent par exemple que les apprentissages sont plus efficaces lorsque le tutorat sollicite le questionnement de l'élève que lorsqu'il est orienté par le développement d'explications d'un texte didactique. Il s'agit du cas d'un contenu de biologie, et la question de la transposition est bien entendu posée, au vu de ce que l'on sait sur l'interaction des processus cognitifs et des contenus de connaissances. Le questionnement sur l'impact des textes didactiques (Kalyiuga et al, 1996) en interaction avec les connaissances initiales (*background knowledge*) est provoqué par des constats du même ordre. Intégrer dans des logiciels sur l'algèbre des composants demandant à l'élève non de résoudre telle équation ou de factoriser telle expression algébrique, mais de concevoir quelles questions pourraient se poser à partir d'objets algébriques donnés, à partir de leur écriture, est une voie de recherche en ce sens. Le questionnement peut d'ailleurs être "partagé" entre le système et l'enseignant. L'hypothèse cognitive sous-jacente à ce point de vue est que la conceptualisation est liée à la question des propriétés perceptives : "qu'est ce que je vois, à quoi ça ressemble" et à la questions des interactions entre types de propriétés : propriétés fonctionnelles : "comment ça marche, qu'est-ce qu'on peut faire dessus", et aux rôles : " qu'est-ce qu'on peut faire avec, à quoi ça sert".

Plusieurs pistes seront étudiées, fondées vers la recherche d'activité de questionnement de l'élève :

- *la coopération des élèves avec des compagnons virtuels paramétrables par l'enseignant ou le chercheur :*

Un premier prototype AMICO fondé sur cette approche, a été développé au LIUM . Il s'agira de développer ce logiciel et de mener des expérimentations pour tester ses effets. L'objectif de ce logiciel est d'inciter les élèves à utiliser l'algèbre pour prouver. En s'appuyant sur les travaux de R. Duval, Brigitte Grugeon fait l'hypothèse que selon le niveau de rationalité dans lequel les élèves sont engagés (preuve par l'exemple, par argumentation, par appel au légal scolaire, par l'algèbre), ils utilisent différents types de justification (exemples, contre-exemple, règles correctes, règles erronées, commentaires) qu'ils expriment dans différents registres sémiotiques (algébriques, numérique, graphique). Avec R. Duval et R. Douady, nous pensons qu'amener les élèves à sélectionner un cadre de résolution à partir d'un jeu entre registres sélectionnés aide les élèves à avoir une meilleure conceptualisation des objets de l'algèbre et les aide à entrer dans des niveaux supérieurs de rationalité. Nous faisons l'hypothèse qu'une interaction avec des compagnons virtuels qui encouragent, contredisent ou déstabilisent en utilisant des registres différents de ceux de l'élève peut favoriser cette flexibilité entre registres sémiotiques.

- **Le jeu de cible :**

Le point de vue du registre algébrique (Duval, 1993, 1996), c'est-à-dire le traitement du système de représentation symbolique constitué par les écritures algébriques et leurs modes de traitement : les EIAH permettent une "réification" de systèmes formels comme celui-ci, et donc une activité de l'élève régulée par les interactions avec le système. Ce processus a été utilisé dans les débuts de l'enseignement des nombres relatifs dans l'équipe de Lauren Resnick à Pittsburg ; il a été aussi à la base d'une introduction au raisonnement par récurrence dans l'enseignement post-obligatoire, par Dubinsky, utilisant comme EIAH un logiciel permettant de représenter et traiter des propositions logiques (comme objets du calcul propositionnel) (Dubinsky, 1991), de sorte à réaliser les conditions d'un processus d'abstraction réfléchissante (dans le cadre de l'épistémologie génétique piagétienne), sur des "objets" qui ne pouvaient être traités que directement à un niveau formel dans un cadre non outillé. Ces possibilités pourraient en particulier être utilisées pour implémenter des situations pratiquement impossibles à constituer en classe, en situations didactiques, pour deux ordres de raisons : utilisation d'objets sans signification pour les élèves au moment de leur introduction, donc il faudrait s'attendre à un conflit majeur, du point de vue des enseignants, avec les représentations dominantes sur le rôle du sens dans les acquisitions en mathématiques, et difficulté majeure pour constituer une situation a-didactique ou pour établir un contrat didactique avec la classe sur une situation exclusivement régulable par l'enseignant. En particulier, les obstacles liés à l'identification du coefficient dans les écritures : x , x^2 , x^3 etc (à la différence de celles du type $3x$, $5x^2$, ou ax^3), et de l'exposant dans les écritures $2x$, ax , etc, et a fortiori x . Un composant de la recherche serait la conception et l'évaluation de l'utilisabilité (par les enseignants et les élèves) d'un logiciel du type "jeu de cibles", portant sur des objets constitués par des écritures algébriques polynomiales (sans avoir besoin de les dénommer en tant que telles). Un tel jeu de cible pourrait également contribuer au diagnostic sur les niveaux de compétence algébrique d'un élève (ou des élèves), soit à destination de l'enseignant, soit intégré dans un EIAH de niveau ultérieur.

Côté enseignant

Il s'agit de créer un outil leur permettant de prévoir des séquences d'activités, de compléter ou modifier la base d'exercices soit d'introduction à l'algèbre, soit de remédiation ou la base d'exercices de diagnostic. Ces activités seront indexées par les compétences en jeu et par la nature de l'interaction.

Le prototype AMICO, développé au LIUM, propose une première modélisation qui permet à l'enseignant d'entrer une consigne et une figure, des listes de réponses d'élèves et de générer automatiquement les dialogues de coopération ou de compétition avec un compagnon virtuel sur des exercices d'un certain type.

Ce deuxième axe de recherche pose d'abord des problèmes de modélisation de l'activité des élèves mais aussi des enseignants.

Axe 3 : Instrumentation du métier d'enseignants

Il s'agit d'étudier avec des méthodes issues de l'ergonomie des logiciels et de la didactique, les conditions d'intégration des logiciels dans les pratiques des enseignants et des formateurs. En s'appuyant sur des cadres théoriques pour analyser les réticences et les incidents observés il s'agit de soulever de nouvelles questions de recherche et de concevoir des logiciels innovants. Enfin nous nous intéresserons à la mise au point de formation des enseignants pour transférer dans les pratiques professionnelles les résultats récents en didactique de l'algèbre. Nous allons poursuivre le travail déjà engagé sur le rôle facilitateur des TICE pour opérationnaliser des résultats de recherche.

De même qu'un certain nombre de recherches ont convergé pour montrer les problèmes de reproductibilité des situations didactiques (Artigue, 1986 ; Bolon, 1999), des recherches sur l'utilisation des logiciels de calcul symbolique ont mis en évidence que l'utilisation de ceux-ci comme EIAH n'était en rien transparente, et demandait un investissement de l'enseignant pour transformer ces outils de calcul en instruments de son action didactique (Lagrange, 2000). L'intégration de cette question dans la problématique générale de l'activité instrumentée (Rabardel, 1995, 1999) conduit à considérer les EIAH non seulement du point de vue des processus d'acquisition de l'élève mais aussi du point de vue de l'activité de l'enseignant, contribuant ainsi à enrichir et s'appuyant sur les recherches qui se mènent sur ce thème en didactique des mathématiques comme en psychologie de l'enseignement des mathématiques.

Méthodologie

Organisation : Deux grandes phases :

1. analyse a priori et conception de situations ou de prototypes
 2. expérimentation des situations et des prototypes
- Pour la conception des situations, il s'agit d'utiliser des méthodes d'analyse a priori puis a posteriori prenant en compte le modèle de compétence algébrique développée par B. Grugeon (1995) pour concevoir puis analyser les différents modèles (modèles paramétrables d'exercices diagnostiques, profils types, modèles paramétrables de situations d'apprentissage et de remédiation types indexées par les profils types).
 - Plusieurs expérimentations sont menées :
 1. Expérimentations menées en classe :
 - Observations de séances avec définition de protocole d'observation,
 - Recueil de données (productions des élèves)
 - Utilisation de vidéo
 2. Expérimentations menées en formation : observations de séances de formation avec définition de protocoles d'observation
 3. Expérimentations menées en laboratoire : observations de l'activité de l'enseignant pour concevoir des interfaces différenciées de présentation de profils
 - Plusieurs recueils de données sont réalisés :
 - Corpus des réponses au test diagnostique : celui obtenu à partir du test papier-crayon en classe et celui des protocoles numérisés d'interaction avec le logiciel Pepite1
 - Réponses aux questionnaires enseignants afin de repérer les critères de choix pour sélectionner des exercices diagnostiques à un niveau donné, des situations d'apprentissage ou de remédiation
 - Productions d'élèves et interventions d'enseignants
 - Vidéo en classe ou en laboratoire
 - Méthode d'analyse des données :
 - analyse a priori / a posteriori pour une analyse interne et qualitative des données.
 - Analyses statistiques pour valider les modèles.

Programme et échéancier :

Septembre 2002-Septembre 2003 : analyse a priori et conception de prototypes

1. Axe 1 : Diagnostic

- DIDIREM : construction de profils types à partir d'une analyse cognitive a priori du teste diagnostique ; confrontation de cette analyse aux résultats d'une étude statistique sur les protocoles numérisés d'interaction avec le logiciel Pépite1 obtenus lors des expérimentations menées entre 1996 et 2001 ;

- LIUM et IUFM de Créteil : construction de modèles paramétrables d'exercices diagnostiques du logiciel de test Pépite et modélisation du diagnostic pour permettre de générer un test diagnostique à partir d'exercices types paramétrables
 - EC&AF: mise au point de questions à poser à l'élève pour l'inciter à établir des rapports entre les propriétés perceptives, fonctionnelles et les rôles des objets algébriques.
2. Axe 2 : Apprentissage
- LIUM + IUFMs + EC&AF : développement du prototype Amico pour favoriser des apprentissages par interaction avec un compagnon virtuel et tests d'utilisabilité de ce prototype
 - DIDIREM + SASO: élaboration d'une analyse cognitive a priori pour la conception de situations d'apprentissage indexées par les compétences et mise en œuvre informatique de ces situations
3. Axe 3 : Instrumentation du métier d'enseignant
- DIDIREM + IUFM + C&AF : mise en place de formation et observation par un ergonome de la formation, et de la mise en œuvre dans les classes par les professeurs des situations proposées
 - LIUM + C&AF : analyse de l'activité de l'enseignant pour la conception d'interfaces différenciées d'élaboration et de présentation des profils

Septembre 2003-Septembre 2004 : expérimentation des prototypes et intégration des travaux des équipes

- LIUM+ C&AF : intégration dans le logiciel Pepite-2 des profils types et conception du logiciel proposant aux enseignants le diagnostic et des situations de remédiation
- DIDIREM : mise au point d'une expérimentation pour tester les situations de remédiation en début de seconde
- SASO + C&AF : réalisation d'un premier prototype mettant en œuvre des situations et test de ce prototype dans les collèges et lycées et auprès des formateurs en IUFM
- En commun : construction de modèles paramétrables de nouvelles situations d'apprentissage pour concevoir l'outil permettant de générer des exercices à partir de situations types paramétrables
- SASO : production d'une maquette de système auteur et production d'un rapport contenant les modèles de situations d'apprentissage mis en place.

Conséquences attendues

Développement de l'articulation entre recherche fondamentale et sur le terrain

Création de synergie de compétences afin d'affirmer la présence de la recherche francophone au niveau international

Diffusion des prototypes sur Internet (<http://pepite.univ-lemans.fr>)

Diffusion des formations d'enseignants sur internet (http://maths.creteil.iufm.fr/formation_continue)

Collaboration recherche et développement avec des équipes étrangères

Valorisations

Colloques, publications

Ces travaux donneront lieu à des publications

- dans le domaine des Environnements Informatiques d'Apprentissage Humain
 - Revue Sciences et Techniques Educatives, congrès EIAH 2003
 - International Journal of Artificial Intelligence in Education, Conference on AI&ED 2003, ITS 2004
- en Communication Homme/Machine :
 - IHM'2003
- en Didactique des mathématiques et psychologie :
 - Revue de Didactique des mathématiques RDM, ESM
 - International Journal of Computers for Mathematical Learning.
 - Learning Mathematics with Computers
 - Congrès ICME
 - Psychology of Mathematics Education

5. Moyens du demandeur et de ces partenaires en personnel et en équipement affectés à la réalisation de ce travail

Les participants outre les salaires des fonctionnaires inscrits dans le projet fournissent un poste de travail fixe à chaque participant et le logiciel nécessaire à la réalisation du projet.

Équipe LIUM, Université du Maine, Le Mans

Élisabeth Delozanne (MCF informatique) 3 mois

Pierre Jacoboni (MCF informatique) 2 mois

Dominique Prévité (Doctorante informatique) 6 mois

Les équipements sont ceux du laboratoire : un ordinateur par chercheur

Équipe Didirem, Université Paris 7

Brigitte Grugeon (MCF didactique) 3 mois

Michele Artigue (PR Didactique) 1 mois

Laurent Souchard (Doctorant Didactique des Mathématiques) 6 mois

Caroline Bardini (Doctorante épistémologie et Didactique des Mathématiques) 3 mois

Equipe Cognition & Activités Finalisées

Rogalski Janine (Directeur de recherche CNRS) 1 mois

Anibal Cortès (Ingénieur de recherche CNRS) 1 mois

Les équipements sont ceux du laboratoire : un ordinateur par chercheur

Équipe STICE, IUFM de Créteil

Élisabeth Delozanne (MCF informatique) 3 mois

Sylvie Normand (Docteur, Linguistique) 2 mois

Marie-Christine Marilier (Docteur en Sciences de l'éducation) 2 mois

Équipe IUFM d'Amiens

Brigitte Grugeon (MCF didactique) 3 mois

Équipe SASO, UPJV, Amiens

Un doctorant en Informatique (bourse régionale demandée), réponse en Avril, 12 mois

Les aides demandées concernent des vacances pour monter des expérimentations, des frais de mission pour participer à des colloques et pour réunir l'équipe et enfin l'achat d'ordinateurs et matériel audio et vidéo portables pour mener à bien les expérimentations sur le terrain.

ANNEXE 1 : PUBLICATIONS SUR LE SUJET DES EQUIPES PARTICIPANT AU PROJET

– Equipe Cognition & Activités Finalisées

Cortes, A. (1998). Implicit cognitive work in putting word problems into equation form. In A. Olivier, K. Newstead, Eds., *22nd PME Conference*, Stellenbosch, South Africa: University of Stellenbosch, Tome 2, pp.208-215.

Cortès A. (1998). Tâche de sélection de Wason : fonction mathématique et contrainte de nécessité. In D. Kayser, A. Ngugen-Xuan, A. Holley, Eds., *VIIème Colloque de l'Association pour la Recherche Cognitive (ARC'98)*, pp. 304-309.

Cortès, A., Pfaff, N. (2000). Solving equations and inequations : operational invariants constructed by students. *Proceedings of the 24th Conference of Psychology of Mathematics Education*

Cortes, A., Pfaff, N. (à paraître) Le calcul littéral : invariants opératoires et schèmes construits par les élèves. In G. Vergnaud, Ed., *Qu'est-ce que la pensée ? Compétences complexes dans l'éducation et le travail*

Errecalde P., Hocquenghem S., Rogalski J. (1984). Utilisation de logiciels pour étudier les relations nombre-espace chez les élèves de 10 à 13 ans. *Actes du premier colloque scientifique francophone sur l'enseignement assisté par ordinateur, A.D.I.* (Ed) Lyon, 113-131.

Rogalski J. (1985). Number and space : a study of acquisition of cartesian representations using educational software, in H. Mandl, E. De Corte, N. Bennet & H.F. Friedrich (Eds). *Learning and instruction in an international context*. Oxford: Pergamon.

Rogalski J. (1986). Acquisition of number-space relationships using educational and research programs. *Proceedings of the 9th meeting PME, Noordwijkerhout*, 71-76.

Rogalski, J. (1988). Les représentations d'une communauté scientifique sur les tuteurs intelligents. In M. Vivet (Éd.), *Actes de la "Summer University ITS, Le Mans* (pp. 233-246). Le Mans : Université LM.

Rogalski, J. & Samurçay, R. (1993). Task analysis and cognitive model as a framework to analyse environments for learning programming. In E. Lemut, B. du Boulay & G. Dettori (Eds.), *Cognitive models and intelligent environments for learning programming*, (pp. 6-19). Berlin : Springer-Verlag.

Rogalski, J. (1997). Simulation dans la formation à la gestion d'environnement dynamique : approche de didactique professionnelle. In M. Baron, P. Mendelsohn & J.-F. Nicaud (Eds.), *EIAO'97 Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur*, (pp. 25-36). Paris: Hermès.

- Rogalski, J. (2001). Y a-t-il un pilote dans la classe? Apport des concepts et méthodes de psychologie ergonomique pour l'analyse de l'activité de l'enseignant. Dans T. Assude et B. Grugeon (éds.), *Actes du séminaire national de didactique des mathématiques 2000*, (pp. 143-164). Paris. ADIREM-IREM Université Paris7.
- Rogalski, J. (2001). Une méthode d'élaboration de situations didactiques. In : *Methodology for training design for telework* (pp. 38-48). Rapport contrat NETPATH/ CAF-2003. Saint-Denis : Université Paris8.
- Samurçay, R. & Rogalski, J. (1998). Exploitation didactique des situations de simulation. *Le Travail Humain*, 61(4), 333-359.

— **Équipe DIDIREM**

- Michèle ARTIGUE, *Une approche didactique de l'intégration des EIAO à l'enseignement*, in D. GUIN, J.-F. NICAUD et D. PY, EIAO, Tome 2, pp. 17-28, Eyrolles, Paris, 1995.
- Michèle Artigue, Teresa Assude, Brigitte Grugeon, Agnès Lenfant, Teaching and Learning Algebra : approaching complexity through complementary perspectives, In Helen Chick, Kaye Stacey, Jill Vincent et John Vincent (Eds), The future of the Teaching and Learning of Algebra, Proceedings of 12 th ICMI Study Conference, The University of Melbourne, Australia, December 9-14, 2001
- Brigitte GRUGEON et Michèle ARTIGUE, *Issues linked to the transition between didactic institutions : the case of algebra in the transition from vocational high schools to general high schools*, PME, 1995.
- Brigitte GRUGEON, *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.
- Brigitte GRUGEON, *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.
- Brigitte HASQUENOPH-BERNOU, *Analyse des effets de la transposition informatique de tâches en algèbre élémentaire*, Mémoire de DEA de didactique des mathématiques, Université Paris VII, 1998.
- Saïd IAMARENE, *Contribution à l'automatisation du repérage du fonctionnement des élèves en algèbre*, Mémoire de DEA de didactique des mathématiques, Université Paris VII, 1998.

— **Équipe LIUM**

- Eric Bruillard, Elisabeth Delozanne, Pascal Leroux, Paul Delannoy, Xavier Dubourg, Pierre Jacoboni, Jérôme Lehuen, Daniel Luzzati, Philippe Teutsch (2000). 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.
- Élisabeth DELOZANNE, Pierre JACOBONI, *Elise: un logiciel pour s'entraîner à une méthode de calcul de primitives*, Journées d'études " Environnement informatiques de calcul symbolique et apprentissages des mathématiques ", Rennes, 15-16 Juin 2000.
- Stéphanie JEAN, *A System to Assess Students' Competence that re-use a Pencil and Paper Tool*, (poster) User Modeling: Proceedings of the Seventh International Conference, Edited by Judy Kay, Springer Wien New York, pp. 337-338, 1999.
- Stéphanie JEAN, *Pépité un système d'assistance au diagnostic de compétences*, Thèse de l'Université du Maine, Le Mans, Janvier 2000.
- Stéphanie JEAN, *Application de recommandations ergonomiques : spécificités des EIAO dédiés à l'évaluation*, Actes des Rencontres Jeunes Chercheurs en IHM 2000, pp 39-42, mai 2000.
- Stéphanie JEAN, *Manipulation des expressions algébriques en environnement informatisé*, in "Calcul formel et apprentissage des mathématiques", Actes des journées "Environnements informatiques de calcul symbolique et apprentissage des mathématiques", 15-16 juin 2000, Rennes, Documents et travaux de recherche en éducation, Vol. 46, INRP, 2001.
- Stéphanie,JEAN-DAUBIAS *Transmission d'informations complexes : Le cas de profils d'élèves construits automatiquement et transmis à l'enseignant*, Actes de la conférence NîmesTIC 2001, pp. 21-26, 2001.
- Stéphanie JEAN-DAUBIAS *Un système d'assistance au diagnostic de compétences*, Actes du 13ème Congrès Francophone RFIA, Angers, Vol.3, pp.1053-1061, 2002.

— **Publications communes LIUM-DIDIREM**

- Élisabeth DELOZANNE, Pierre Jacoboni, Stéphanie JEAN et Brigitte GRUGEON, *Assessing Students' Competence in Algebra*, Workshop "Learning Algebra with the Computer, a transdisciplinary Workshop", ITS 2000, Montreal, June 2000.
- Élisabeth DELOZANNE, Brigitte GRUGEON : *Pepite: software to help teachers diagnose students' algebra competencies*, The future of the Teaching and Learning of Algebra, Individual presentation, ICMI Study Conference, The University of Melbourne, Australia, December 9-14, 2001
<http://www.edfac.unimelb.edu.au/DSME/icmialgebra/PPTPresentationIndex.html#Individual>
- Xavier DUBOURG, Elisabeth DELOZANNE et Brigitte GRUGEON, *Situations d'interaction en EIAO : le système repères*, in D. GUIN, J.-F. NICAUD et D. PY, EIAO, Tome 2, pp. 233-244, Eyrolles, Paris, 1995.

École et sciences cognitives : Les apprentissages et leurs dysfonctionnements

Xavier DUBOURG, Elisabeth DELOZANNE et Brigitte GRUGEON, *Situations of Interaction in Learning Environment : the System REPERES*, International Conference on Computers in Education, Singapore, décembre 1995.

Brigitte GRUGEON, Elisabeth DELOZANNE, *Vers une problématisation des TIC dans l'enseignement des mathématiques*, Journées d'études " Environnement informatiques de calcul symbolique et apprentissages des mathématiques ", Rennes, 15-16 Juin 2000.

Stéphanie JEAN, Elisabeth DELOZANNE, Pierre JACOBONI et Brigitte GRUGEON, *Conception, réalisation et évaluation d'interfaces en ELAO : l'exemple de PEPITE*, Actes des 5^{èmes} journées ELAO de Cachan, Hermès, pp. 37-48, 1997.

Stéphanie JEAN, Elisabeth DELOZANNE, Pierre JACOBONI et Brigitte GRUGEON, *PÉPITEST, a software to establish the cognitive profile of the students in elementary algebra*, IFIP WG 3.3 Working Conference " Human Computer Interaction and Educational Tools ", Sozopol, Bulgarie, pp. 198-206, 1997.

Stéphanie JEAN, Pierre JACOBONI, Elisabeth DELOZANNE et Brigitte GRUGEON, *Design, implementation and evaluation of an interface in a Computer Based Learning Environments: the example of PÉPITE*, AIED' 97, Japon, pp. 593-600, 1997.

Stéphanie JEAN, Elisabeth DELOZANNE, Pierre JACOBONI et Brigitte GRUGEON, *Cognitive profile in elementary algebra: the PÉPITE test interface*, IFIP TC-3 Official Journal " Education and Information Technology ", special issue, 1998.

Stéphanie JEAN, Elisabeth DELOZANNE, Pierre JACOBONI et Brigitte GRUGEON, *Design and Validation of a Model based Diagnosis System*, in P. Brna, M. Baker and K. Stenning "Roles of Communicative Interaction in Learning to Model in Mathematics and Science", C-LEMMAS, Corsica, 15th – 18th April 1999.

Stéphanie JEAN, Elisabeth DELOZANNE, Pierre JACOBONI et Brigitte GRUGEON, *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.

Dorothee Rasseneur, Elisabeth Delozanne, Pierre Jacoboni et Brigitte Grugeon, *Learning with virtual agents: Competition and Cooperation in AMICO*, Actes du colloque ITS'2002, Biarritz, juin 2002, (accepté en papier long), à paraître.

Mémoires de DEA autour du projet

JEAN Stéphanie, *Conception et réalisation d'un système de diagnostic de profils d'élèves en algèbre*, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, 1996.

LENFANT Agnès, *Etude sur la transposition d'un outil de recherche destinée aux enseignants*, Mémoire de DEA de Didactique des Mathématiques, Université Paris VII, 1997.

HASQUENOPH-BERNOU Brigitte, *Analyse des effets de la transposition informatique de tâches en algèbre élémentaire*, Mémoire de DEA de Didactique des Mathématiques, Université Paris VII, 1998.

IAMARENE Saïd, *Contribution à l'automatisation du repérage du fonctionnement des élèves en algèbre*, Mémoire de DEA de Didactique des Mathématiques, Université Paris VII, 1998.

PROVOST Jérémy, *PépiProfil, un outil utilisable par les enseignants pour la gestion de classe*, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, 1999

ROGOZAN Codruta Délia *Conception d'une situation d'interaction dialoguée entre l'apprenant et un compagnon virtuel favorisant l'argumentation et le changement de registres d'expressions en algèbre*, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, 2000

RASSENEUR Dorothee, *Modélisation et génération d'exercices mathématiques fondés sur la coopération ou la compétition entre des élèves et des agents virtuels*, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, 2001.

Coordination d'ouvrages autour de ces thèmes

Élisabeth Delozanne, Pierre JACOBONI, (éditeurs), *Interaction Homme-Machine pour la formation et l'apprentissage Humain*, numéro spécial de la revue Sciences et Techniques éducatives, Hermès, vol 8 n°3-4/2001.

Jean-François NICAUD, Elisabeth DELOZANNE, Brigitte Grugeon (éditeurs), *numéro spécial Environnements informatiques d'apprentissage de l'algèbre*, Revue Sciences et Techniques éducatives, volume 9-n°1-2/2002, Hermès, (à paraître Avril 2002).

ANNEXE 2 : REFERENCES

Armatte, M. (1996). *Mathématiques « modernes » et sciences humaines*. In Belhoste B, Gispert H & Hulin N (Eds.) *Les sciences au lycée. Un siècle de réformes des mathématiques et de la physique en France et à l'étranger*, pp.77-88, Vuibert, INRP, Paris.

Artaud, M. (1997). *Introduction à l'approche écologique du didactique. L'écologie des organisations mathématiques et didactiques*. Actes de la IX^{ème} Ecole d'été de didactique des mathématiques, Houlgate, pp.101-139, IUFM de Rennes.

- Artigue, M. (1986). Etude de la dynamique d'une situation de classe : une approche de la reproductibilité, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 7/1.
- Artigue, M., Aussadez, T., Grugeon, B., Lenfant, A., Teaching and learning algebra: Approaching complexity through complementary perspectives, 12th ICMI study, H. Chick, K. Stacey, J & J. Vincent, (Eds), Melbourne (Australia), vol 1(2001) 21-32
- Arzarello F. (1993) : Analysing algebraic thinking. ESRC Seminar Group Working Conference in Algebraic processes and the role of symbolism. Institute of Education. University of London, September 1993
- Assude, T. (2000). De l'évolution de l'enseignement des inéquations au XXème siècle, Actes du colloque international EM2000, Grenoble (à paraître).
- Boekaerts, M. (1999). Metacognitive experiences and motivational state as aspects of self-awareness: Review and discussion. *European Journal of Psychology of Education*, 14(4), 571-584.
- Balacheff, N., Vivet M., (1994) *Didactique et intelligence artificielle*, La pensée sauvage éditions.
- Beeson, M., MathXpert : un logiciel pour aider les élèves à apprendre les mathématiques par l'action, STE, vol 9 N°1-2 /2002, à paraître
- Béguin P, Rabardel P (2000), Concevoir pour les activités instrumentées, In Alain Vom Hofe coordinateur, *Interactions Homme-Système : perspectives et recherches psycho-ergonomiques*, numéro spécial de la Revue d'intelligence Artificielle, vol 14 – n° 1-2/2000, Hermès, pages 35 à 54
- Bednarz N., Kieran C. & Lee L. (Eds.) (1996). *Approaches to algebra: Perspectives for research and teaching*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- Boekaerts, M. (1997). Self-regulated learning: a new concept embraced by researchers, policy makers, educators, teachers, and students. *Learning and Instruction*, 7(2), 161-186.
- Belhoste, B. (1995). *Les sciences dans l'enseignement secondaire français. Textes officiels*, Tome 1 : 1789-1914, Editions Economica, INRP, Paris.
- Belhoste, B., Gispert, H. & Hulin, N. (Eds.) (1996). *Les sciences au lycée. Un siècle de réformes des mathématiques et de la physique en France et à l'étranger*, Vuibert, INRP, Paris.
- Belhoste, B. (1997). L'histoire de l'enseignement mathématique au collège et au lycée. In P. Legrand (Ed.) *Les maths en collège et en lycée*, pp.368-387, Hachette, Paris.
- Bruillard, E., Delozanne, E., Leroux, P., Delannoy, P., Dubourg, X., Jacoboni, P., Lehuen, J., Luzzati, D., Teutsch, P., (2000) Quinze ans de recherche informatique sur les sciences et techniques éducatives au LIUM, *Revue Sciences et Techniques Educatives*, hommage à Martiel Vivet, Hermès, vol 7, n° 1, (2000) 87-145
- Bosch, M. & Chevallard, Y. (1999). La sensibilité de l'activité mathématique aux ostensifs. *Objet d'étude et problématique*, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol.19.1, 77-124
- Chi, M. T. H. (2001). Learning from human tutoring. *Cognitive Science*, 25(4), 471-534.
- Cerruli M., Mariotti, M.-A., (2002), L'algebrista : un micromonde pour l'enseignement et l'apprentissage de l'algèbre, STE, vol 9 N°1-2 /2002, à paraître.
- Chan, T.-W., Some learning systems: an overview, *Innovate adult learning with innovate technologies*, North-Holland, Collis B. Davies G. (1995) 101-122
- Dubinsky, E. (). In D. Tall et al. (Eds.), *Advanced mathematical thinking*.
- Chevallard, Y. (1985). Le passage de l'arithmétique à l'algébrique dans l'enseignement des mathématiques au collège – première partie : l'évolution de la transposition didactique. *Petit x* n°5, 51-94.
- Chevallard, Y. (1989). Le passage de l'arithmétique à l'algébrique dans l'enseignement des mathématiques au collège – deuxième partie : perspectives curriculaires : la notion de madélisation, *Petit x* n°19, 43-72.
- Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique : perspectives apportées par une approche anthropologique, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol.12/1, 73-112.
- Chevallard, Y. (1997). Familière et problématique, la figure du professeur, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 17/3, 17-54.
- Chevallard, Y. (1999). Analyse des pratiques enseignantes et didactique des mathématiques : l'approche anthropologique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 19/3,
- Douady R. (1985), The Interplay between Different Settings: Tool-Object Dialectic in the Extension of Mathematical Ability: Examples from Elementary School Teaching, in Streefland ed, proceedings of the ninth International Conference for the Psychology of Mathematics Education (2), 33-53, 1985.
- Drouhard J.P. (1992) : Les écritures symboliques de l'algèbre élémentaire, Thèse de doctorat, Université Paris 7.
- Dubinsky Ed, (1991) : Reflective abstraction in Advanced Mathematical Thinking, in *Advanced Mathematical Thinking*, David Tall (Ed), Kluwer Academic Publishers, 95-123
- Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, 5, 37-65.
- Duval R. (1996) : "Quel cognitif retenir en didactique des mathématiques". *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol 13/3, pp. 349-380, Editions La Pensée Sauvage.
- Grandbastien, M., Bruillard E. (eds), *education et Informatique*, *Revue Sciences et Techniques Educatives*, hommage à Martiel Vivet, Hermès, vol 7, n° 1, (2000) 87-145

- Grugeon, B. (1995). Etude des rapports institutionnels et des rapports personnels des élèves dans la transition entre deux cycles d'enseignement. Doctorate Thesis. Université Paris 7.
- Heffernan, N. T., Koedinger, K. R., Intelligent tutoring systems are missing the tutor: building a more strategic dialog-based tutor, Workshop "Learning algebra with the computer", ITS 2000, Montréal (2000)
- Jean S., Pépite un système d'assistance au diagnostic de compétences, Thèse de l'Université du Maine, Le Mans, Janvier 2000.
- Kalyuga, S., Chandler, P. & Sweller, J. (1998). Levels of expertise and instructional design. *Human Factors*, 40(1), 1-17.
- Koedinger K., Anderson J.R (1997), Intelligent Tutoring Goes To School in the Big City, *IJAIED* (1997) 8, 30-43
- Kieran C. (1992) : 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.
- McNamara, D., Kintsch, E., Songer, N. B. , & Kintsch, W. (1996). Are good texts always better? Interactions of text coherence, background knowledge, and levels of understanding in learning from text. *Cognition and Instruction*, 14, 1-43.
- Lagrange, J.-B. (2000). Approches didactiques et cognitives d'un instrument technologique dans l'enseignement : le cas du calcul formel en lycée, Habilitation à diriger des recherches, Université Paris 7.
- Lagrange, J.-B. (2001). L'intégration d'instruments informatiques dans l'enseignement : une approche par les techniques, *Educational Studies in Mathematics*, Ed, Kluwer Academic Publishers, N°43, 1-30.
- Lajoie S. & Vivet M. (eds), (1999) Proceedings of Artificial Intelligence in Education, Le Mans July 99, IOS Press, Amsterdam, p. 491-498.
- 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 VI, juin 1995.
- Nicaud, J.-F. (1994), Modélisation en EIAO, les modèles d'APLUSIX, in N. Balacheff et M. Vivet, *Didactique et intelligence artificielle*, pp. 68-112, La pensée sauvage éditions, 1994.
- Nicaud J.-F., Delozanne É., Grugeon B. (éditeurs), (2002) numéro spécial Environnements informatiques d'apprentissage de l'algèbre, *Revue Sciences et Techniques éducatives*, volume 9-n°1-2/2002, Hermès, (à paraître).
- Noss, R. and Hoyles, C.: 1996, *Windows on Mathematical Meanings*, Kluwer.
- Rabardel, P. (1995). Les hommes et les technologies. Une approche cognitive des instruments contemporains. Paris: Colin.
- Rabardel, P. (1999). Eléments pour une approche instrumentale en didactique des mathématiques, in *Actes de l'école d'été de didactique des mathématiques*, Houlgate 18-21 Août 1999, IUFM de Caen.
- Rogalski, J. (2001). Y a-t-il un pilote dans la classe. Approche de psychologie ergonomique de l'activité de l'enseignant. (actes du séminaire national de didactique des mathématiques, je n'ai pas la réf. ici).
- Sfard A. et Linchevski L. (1994) : The gains and the pitfalls of reification -- The case of algebra, *Educational Studies in Mathematics*, Vol. 26, pp. 191-228.
- Trouche, L. (1996). A propos de l'apprentissage des limites de fonctions dans un environnement calculatrice. Etude des rapports entre processus de conceptualisation et processus d'instrumentation, Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2
- VanLehn K., Martin J., (1997) Evaluation of an Assessment System based on Bayesian Student Modeling, *IJAIED* (8-3/4), 179-221, 1997.
- Vergnaud G. (1986) : Long terme et court terme dans l'apprentissage de l'algèbre in *Actes du premier colloque franco-allemand de didactique*, Éditions La Pensée Sauvage.
- Vergnaud G., Cortès A., Favre-Artigue P. (1987) : Introduction de l'algèbre auprès de débutants faibles. Problèmes épistémologiques et didactiques in *Actes du colloque de Sèvres : Didactique et acquisition des connaissances scientifiques*, pp. 259-288, Éditions La Pensée Sauvage.
- Vergnaud G. (1990) : La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol 10/1.2, pp. 133-170, Éditions La Pensée Sauvage.
- Vivet M. (1990), Uses of ITS: Which role for the teacher?, in Costa (eds.), *New Directions for Intelligent Tutoring Systems*, NATO ASI series, Vol. F91, Springer-verlag, Sintra, 1990.