
Quinze ans de recherche informatique sur les sciences et techniques éducatives au LIUM

**Éric Bruillard, Élisabeth Delozanne, Pascal Leroux,
Paul Delannoy, Xavier Dubourg, Pierre Jacoboni,
Jérôme Lehuen, Daniel Luzzati, Philippe Teutsch**

LIUM Université du Maine Le Mans France

RESUME : Dans ce texte les membres du LIUM ayant travaillé dans l'équipe EIAO présentent les recherches conduites sous la direction ou impulsées par Martial Vivet. Une première partie développe les fondements de la politique scientifique suivie et décrit les travaux de l'équipe en les regroupant autour de trois axes principaux : les tuteurs intelligents et la planification pédagogique, la conception de micromondes pour la formation professionnelle et, enfin, la modélisation des situations d'apprentissage et les environnements d'apprentissage ouverts et distribués. Une discussion autour des problématiques de recherche actuelles dans le domaine termine ce tour d'horizon.

ABSTRACT: In this paper, the members of the computer science laboratory of Le Mans (LIUM), in the AIED and microworld team, show the research that have been undertaken under the direction or the impulsion of Martial Vivet. A first part of the text underlines the foundations of the scientific policy and describes the works of the team around three main strands: intelligent tutoring systems and pedagogical planning, microworlds design for vocational training, and, finally, learning situations modelling and open and distributed learning environments. A discussion about current research issues closes this overview.

MOTS-CLES : EIAH, EIAO, tuteurs intelligents, micromondes, planification pédagogique, explications, situations d'apprentissage, diagnostic de compétences, apprentissage collaboratif, environnements d'apprentissage ouverts et distribués

KEY WORDS AIED, ITS, microworlds, pedagogical planning, explanations, learning situations, competencies diagnostic, open and distributed learning environments

***Avertissement :** Le texte qui suit émane de chercheurs du LIUM qui ont travaillé dans l'équipe EIAO sous la direction de Martial Vivet. Essayant de re-situer une trajectoire, les idées de Martial ont été sans doute réinterprétées, tout en restant proches, de notre point de vue, de celles qu'il avait lui-même défendues. Il s'agit d'une synthèse collective sur des recherches menées en commun, non un bilan des apports propres de Martial Vivet à l'EIAO (bien qu'ils soient en fait abondamment présentés mais sans les distinguer de ceux de l'équipe). Il n'a pas été possible de rendre compte de tous les travaux et dans la présentation, des systèmes, des pistes, des projets ont certainement été oubliés. Nous présentons par avance nos excuses sur ce point.*

1. Introduction

Dans le cadre d'un ouvrage consacré à Martial Vivet, nous avons souhaité faire le point sur les recherches qu'il a impulsées et dirigées au sein de l'équipe EIAO du LIUM (laboratoire d'informatique de l'université du Maine). Hommage à notre directeur trop tôt disparu, ce travail de mémoire est un peu un "récit de vie" de notre équipe. C'est l'occasion de présenter collectivement le travail qui a été effectué, en essayant de faire émerger les dynamiques les plus productives. En ce sens, il ne s'agit pas d'écrire l'histoire de l'équipe, sans doute une des plus importantes du domaine de l'EIAO au plan français, mais plutôt de faire une relecture des travaux qui y ont été conduits afin de capitaliser les résultats de recherche obtenus, de tirer les leçons des impasses rencontrées et, à la lumière des thématiques actuelles, de repérer les évolutions les plus marquantes. Ces évolutions sont à mettre en parallèle avec celle du domaine qui s'est appelé successivement micromonde, EIAO (dans l'acception Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur puis Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur), EIAH (Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain) et qui se transforme encore avec l'explosion des technologies de l'information et de la communication. Le déferlement de la vague Internet qui donne une nouvelle jeunesse aux questions de télé-enseignement, les évolutions techniques (informatique nomade, interfaces multimodales, réalité augmentée etc.), qui invitent sans arrêt à modifier et à enrichir les environnements d'apprentissage, nous amènent d'autant plus à réfléchir sur les apports des différentes recherches que nous avons menées.

Cette réflexion nous conduit également à tenter de préciser l'identité de l'équipe que Martial Vivet a fondée à la fin des années quatre-vingts, identité sans doute amenée à se transformer dans les années qui viennent. Comment caractériser une activité de recherche dans le champ des applications de l'informatique à l'éducation ? Nous le verrons, le mot application est sans doute impropre, puisqu'il ne s'agit pas d'investir le domaine de l'éducation avec des méthodes et des dispositifs

issus de l'informatique, mais de voir comment l'articulation de deux domaines permet de les enrichir mutuellement, dans une conception où l'informatique n'est pas totalement étrangère aux sciences humaines et dans laquelle on ne peut concevoir des dispositifs sans s'intéresser à ceux qui les utilisent ou sont susceptibles de le faire.

Après avoir développé les fondements de la politique scientifique de l'équipe EIAO au sein du LIUM, et situé brièvement les grands axes de recherche suivis par Martial Vivet, nous présentons les travaux et leur évolution en les regroupant autour de trois thèmes de recherche principaux : les tuteurs intelligents et la planification pédagogique, la conception de micromondes pour la formation professionnelle, et enfin la modélisation des situations d'apprentissage et les environnements d'apprentissage ouverts et distribués. Cette façon d'exposer présente des inconvénients : elle ne suit qu'en partie l'ordre chronologique, les projets sont présentés de façon éparse, certains d'entre eux se situant d'ailleurs à l'intersection de plusieurs thèmes. Mais le choix que nous avons opéré présente l'avantage de mettre en évidence les cohérences entre les différents travaux et de mieux éclairer les évolutions et les résultats réutilisables et réutilisés. Pour une présentation systématique des différents projets de l'équipe EIAO du LIUM, le lecteur peut se référer à [Vivet 1999] et à l'annexe regroupant les résumés des thèses dirigées ou co-dirigées par Martial Vivet.

2. Les fondements

Martial Vivet a fondé le laboratoire et a monté en son sein une équipe EIAO, à la fin des années quatre-vingts alors que l'EIAO se déclinait en Enseignement Intelligemment Assisté avec Ordinateur. Si le thème porteur était alors celui des tuteurs intelligents (TI), l'orientation initiale de l'équipe a été très largement déterminée par les directions de recherche précédemment suivies par son fondateur. Après les avoir situées, nous tentons de dégager les lignes directrices qui ont soutenu la mise en place de l'équipe et ont en grande partie façonné sa politique scientifique ultérieure.

2.1. Articuler recherche fondamentale et appliquée

Martial Vivet a commencé sa carrière comme élève d'école normale puis a réussi le CAPES de mathématiques. De ses études, il a gardé un fort intérêt pour la pédagogie et l'enseignement des mathématiques. Au début de sa carrière

universitaire il a travaillé à la formation des enseignants de mathématiques au sein des IREM (Institut de Recherche sur l'Enseignement des Mathématiques), d'abord sur l'utilisation de calculatrices de poche, puis l'enseignement du BASIC et enfin l'introduction dans les classes de LOGO. Ce sont ces premières expériences d'utilisation de dispositifs techniques avec des enseignants et des élèves qui sont à l'origine du travail sur les micromondes et de la préoccupation de mises en scène techniques des interactions de l'apprenant avec des connaissances.

Son intérêt pour la formation s'est rapidement étendu au contexte de la formation professionnelle et il a été un des premiers à explorer les apports possibles de Logo pour l'alphabétisation informatique et technologique d'adultes de bas niveau de qualification [Vivet 2000a, dans ce numéro]. Il a ainsi imaginé un dispositif appelé Caristo, correspondant au chariot de cariste, point de départ d'un axe de recherche lié à la formation technologique et la formation professionnelle continue, axe qu'il a fortement investi : la conception de micromondes et la robotique pédagogique.

Parallèlement, il a passé une thèse de 3^{ème} cycle puis une thèse d'État en Intelligence Artificielle sous la direction de Jacques Pîtrat [Vivet 1973, Vivet 1984]. De là est née la préoccupation pour la modélisation des connaissances et des métaconnaissances et leur utilisation dans l'éducation. Son intérêt pour l'Intelligence Artificielle et la modélisation des connaissances s'est alors investi dans les travaux autour des tuteurs intelligents.

Sur la base de ces premières expériences riches et diversifiées, la ligne directrice de l'activité de recherche de Martial Vivet, a été d'associer étroitement modélisation informatique et recherche sur le terrain. Au sein de l'équipe nous avons adopté, comme d'autres¹, l'hypothèse de travail que les informaticiens devaient accompagner les développements techniques ou théoriques par l'étude des changements qu'ils impliquent tant dans les comportements et les raisonnements individuels que dans les rapports sociaux. "Il n'est plus possible pour les informaticiens de se préoccuper uniquement de la conception de produits en laissant le soin à d'autres d'en spécifier l'usage" [Bruillard et Vivet 1994]. C'est la dialectique entre recherche fondamentale et applications qui a ainsi assuré la dynamique de la politique scientifique de l'équipe.

L'expérimentation, la confrontation aux usages et une attention soutenue pour les conditions de dissémination des résultats de la recherche constituent des éléments fondateurs de nos travaux d'informaticiens au sein de l'équipe que dirigeait Martial Vivet. Loin de considérer l'éducation comme un simple domaine d'application, l'hypothèse sous-jacente est que l'on peut faire progresser globalement recherche en informatique et recherche en éducation en se centrant sur l'apprentissage avec, dans et par des dispositifs techniques. Cette hypothèse induit toutefois des exigences très fortes dans la conduite des recherches.

1. On peut citer par exemple A. Derycke (1997) en France de même que J.S. Brown *et al.* (1989) ou J. Lave et E. Wenger (1991) à l'étranger.

2.2. Des principes qui nourrissent la conception des environnements

En effet, cultiver un lien étroit entre modélisation informatique et expérimentation sur le terrain nécessite de mener des travaux interdisciplinaires, d'explorer le domaine dans sa diversité et, enfin, de développer des prototypes pré-opérationnels.

2.2.1. Des équipes interdisciplinaires

Pour appréhender la complexité des situations d'apprentissage réelles, il importe de croiser problématiques, méthodes, concepts, résultats venant des différentes disciplines concernées et des différents champs dans ces disciplines : l'ensemble des composantes instituées de l'informatique et tous les grands champs de recherche en sciences humaines et sociales. Mais, si un consensus se dégage sur l'intérêt de recherches interdisciplinaires, leur mise en œuvre n'est pas aisée.

La création d'une culture commune, pourtant indispensable, demeure un défi difficile à relever. En effet, la relation client/prestataire de service est inopérante au sein d'une équipe de recherche : au moins une partie des informaticiens doit avoir une solide culture en sciences humaines et, réciproquement, les chercheurs en sciences humaines doivent avoir une culture sérieuse en informatique. Le développement d'une telle culture requiert un investissement important du fait notamment que les modes de pensée, les cadres théoriques, les méthodes sont différents voire même parfois antagonistes. La valorisation des résultats obtenus implique également de clairement établir les questionnements et problématiques par rapport à chaque discipline et de situer les connaissances scientifiques produites par rapport à l'état de l'art de chacune d'entre elles. Au sein de l'équipe EIAO du LIUM, ces conditions ont été au moins partiellement remplies et nous avons mis sur pied des projets, conduits par des équipes formées avec des chercheurs venant d'horizons très divers.

2.2.2. Explorer le domaine dans sa diversité

La nécessité d'affronter la complexité de l'éducation et de la formation a amené Martial Vivet à s'intéresser à tous les champs de recherche du domaine. Sa participation à la plupart des congrès OTAN² montre son implication dans ces

2. New Directions in Educational Technology, Advanced Educational Technologies for Mathematics and Science, Control Technology in Elementary Education, New directions for

différents champs. Les projets de l'équipe ont porté sur la planification pédagogique, le dialogue, les explications, la simulation, les micromondes, l'évaluation de compétences, la modélisation de l'apprenant, les interfaces homme/machine, la coopération entre élèves, le rôle du maître. Les modélisations proposées se sont appuyées sur des niveaux d'études très différents : enseignement primaire, secondaire, universitaire, formation professionnelle (ingénieur, technicien, alphabétisation informatique et technologique), dans des contextes d'enseignement en présence ou à distance. Différents paradigmes d'apprentissage ont aussi été étudiés : apprentissage par la résolution de problèmes, apprentissage par l'action sur des simulateurs ou des micromondes, apprentissage par formation personnalisée, apprentissage par compagnonnage, apprentissage collaboratif, pédagogie de projet. Enfin les différents travaux ont exploré des domaines très divers : mathématiques (analyse, algèbre, géométrie descriptive, calcul mental, combinatoire), jeux (bridge), langues étrangères (anglais, français), technologie, sécurité dans les musées, productique, diagnostic de pannes, emboutissage de carrosserie.

Cette multiplicité des contextes, des publics et des domaines d'application peut donner une impression de dispersion et d'éclatement de la recherche. Mais elle est à notre sens fondamentale pour appréhender le domaine dans sa complexité et sa diversité, pour situer les particularités et définir le domaine de validité des modélisations proposées.

2.2.3. *Développer des prototypes pré-opérationnels*

La validation des modèles proposés, la vérification de l'utilisabilité des solutions informatiques, les contraintes de coopération avec des chercheurs d'autres domaines, nécessitent la réalisation de prototypes que l'on peut qualifier de pré-opérationnels. Des développements informatiques importants sont ainsi indispensables afin que les prototypes soient assez robustes et fiables pour affronter le terrain et permettre de tester les hypothèses de recherche ou de conception. Leur réalisation nécessite une implication forte des chercheurs dans l'équipe de développement, les spécifications s'établissant souvent à partir de maquettes dont la réalisation est étroitement liée à la recherche. Les projets réalisés au sein de l'équipe EIAO du LIUM ont souvent satisfait cette contrainte.

Signalons enfin que la politique d'ouverture de notre équipe s'est concrétisée par l'organisation de nombreuses manifestations nationales et internationales (colloque Logo, congrès de robotique pédagogique, école d'été sur les tuteurs intelligents etc.). La dernière, qui s'est tenue au Mans en juillet 1999, est le congrès AIED (Artificial

Intelligence and Education), rappelant que le laboratoire est né au moment où le thème des tuteurs intelligents était au devant de la scène et a constitué le cadre de recherche des premiers travaux de l'équipe, travaux que nous présentons dans la section suivante avant d'aborder les deux autres thèmes que sont les micromondes et les environnements interactifs d'apprentissage avec ordinateur.

3. Les tuteurs intelligents et la planification pédagogique

Au milieu des années 80, lors de la création de l'équipe, la préoccupation des chercheurs du domaine était de savoir ce que l'Intelligence Artificielle pouvait apporter aux logiciels d'éducation [Nicaud et Vivet 1988]. En s'appuyant sur les limites des logiciels d'enseignement programmé et d'EAO (Enseignement Assisté par Ordinateur, qui proposaient des exercices assez rigides d'entraînement scolaire de type QCM ou avec des réponses très simples), il s'agissait d'envisager les améliorations que l'apparition récente à cette époque des systèmes experts pouvait laisser entrevoir. L'idée était qu'un système expert présente trois caractéristiques intéressantes pour l'enseignement [Delozanne et Vivet 1990] : "il résout les problèmes posés à l'apprenant mais aussi les problèmes posés par l'apprenant ; il explique les solutions qu'il a trouvées ; il peut gérer une session pédagogique en tenant compte de l'apprenant et du contexte". Ces possibilités devaient permettre, pensait-on, d'introduire davantage de flexibilité dans les logiciels d'enseignement.

La situation d'apprentissage alors envisagée est clairement exprimée par la métaphore du Tuteur Intelligent (TI) : un logiciel expert dans le domaine à enseigner et expert en pédagogie pourrait jouer le rôle de tuteur en dialoguant avec un apprenant, notamment à propos de la résolution d'un problème. Les thèmes de recherche dominants correspondaient aux trois modules principaux des TI et concernaient tout d'abord la modélisation de l'expertise du domaine (le TI doit être compétent dans le domaine à enseigner), la modélisation de l'apprenant (le TI doit comprendre ce que fait et sait l'élève afin de réagir de façon adaptée) et la modélisation de la connaissance pédagogique (le TI doit savoir quelles activités proposer à l'élève et comment le guider).

Les premiers travaux menés au sein de l'équipe ont concerné la planification pédagogique, thème récurrent dans l'équipe, repris et enrichi ensuite dans d'autres projets dont ce n'était pas forcément l'objectif principal. Il est significatif de la préoccupation de l'époque d'adapter des outils et des modèles de l'Intelligence Artificielle à l'éducation. La planification appliquée à la résolution de problème pour les systèmes experts constitue en effet un champ de l'Intelligence Artificielle dont la littérature est prolifique. Les travaux successifs menés par notre équipe vont refléter l'évolution des champs d'application de la planification. Abordée sous l'angle de la résolution de problème en calcul formel et calcul mental, la planification devient un outil de modélisation et de gestion des sessions

pédagogiques, des explications, du dialogue et de l'interaction entre le système et l'apprenant. La première approche dans Camélia [Vivet 1984] vise à expliciter sous la forme de plans les méthodes de résolution de calcul algébrique (intégration et développements limités). Le moteur de résolution et la structure des connaissances s'étant révélés assez génériques, elles ont été ensuite réifiées pour donner naissance à KEPLER (Kernel Engine for Plan Evaluation and Run) [Vivet 1988a]. Ce moteur, ainsi que la modélisation déclarative des connaissances associant règles, plans et méta connaissances, ont servi de base conceptuelle pour une série de travaux de l'équipe EIAO du LIUM sur les tuteurs intelligents autour du projet Amalia et de ses évolutions.

Au travers des projets CAMELIA et AMALIA nous présentons la structuration des connaissances et le fonctionnement du moteur KEPLER, puis nous évoquons leur utilisation pour la mise en place d'une gestion pédagogique dans des tuteurs intelligents. Nous abordons ensuite la planification sous l'angle de la gestion du dialogue et de l'interaction et enfin sous l'angle de la gestion des explications.

3.1. CAMELIA

Le système expert CAMELIA [Vivet 1984] permet, en associant connaissances déclaratives et procédurales, de conduire des preuves et des calculs symboliques. Construit comme sur-couche du système de calcul symbolique REDUCE, il se présente comme une synthèse d'approches algorithmique et heuristique, tirant parti à la fois des performances de résolution de REDUCE et des capacités de résolution d'un système à base de connaissances. L'objectif initial était de disposer d'un système de Mathématiques Assistées par Ordinateur.

Les connaissances algorithmiques sont prises en charge par des procédures REDUCE. Les connaissances heuristiques spécifiques du domaine sont séparées du moteur de résolution afin d'appliquer le modèle à des domaines variés (le calcul de primitives, le calcul de développements limités, le calcul mental, l'utilisation du traitement de texte, etc.). Les bases de connaissances sont structurées en trois niveaux : les règles de réécriture, les plans et les méta-règles.

Les règles expriment les connaissances sûres du domaine. Elles sont écrites comme des règles de réécriture, par exemple que "La primitive de $\cos(x)$ SE REECRIT $\sin(x)$ ".

Les plans représentent les savoir-faire du domaine. Ils expriment à la fois des connaissances déclaratives sur le type de problème à résoudre (pattern de problème), la description du contexte d'application du plan et l'ordonnement des actions à réaliser pour exécuter ce plan. Ces actions sont soit des algorithmes immédiatement exécutables (des procédures REDUCE à exécuter), soit font l'objet d'une résolution heuristique (un sous-problème à résoudre).

Les méta-connaissances sont représentées de manière déclarative sous la forme de métarègles. Elles permettent au moteur du système de retenir pour un problème donné des plans de résolution candidats, puis d'effectuer une sélection en éliminant des plans non pertinents dans le contexte et enfin de réaliser un classement des plans restants en attribuant des notes concernant l'intérêt d'un plan et son coût d'exécution. À l'issue de ce classement, le moteur cherche à appliquer le premier plan puis en cas d'échec le second et ainsi de suite.

La gestion des connaissances et métaconnaissances déclaratives permet de savoir pourquoi le système a estimé qu'un plan est valide ou non par rapport à un problème et pourquoi un plan dans un contexte donné a été jugé plus pertinent qu'un autre. Elle fonde les capacités du système à expliquer sa résolution.

<p>MR1 : Si un plan impose un opérateur rare, Et cet opérateur figure dans le problème Alors augmenter fortement l'intérêt de ce plan.</p> <p>MR2 : Si l'élève ne connaît pas un opérateur Alors éliminer tous les plans imposant cet opérateur.</p>

Figure 1. Exemple de méta-règle de contrôle de la résolution (MR1) et de contrôle pédagogique(MR2).

KEPLER est un moteur d'inférence qui interprète les plans selon une stratégie qui peut elle-même être présentée sous forme d'un plan (figure 2)

<p>Pour <résoudre un problème> Essayer successivement déterminer tous les plans applicables en appliquant les méta-règles choisir le meilleur plan l'appliquer en cas d'échec choisir un autre plan</p>

Figure 2. Stratégie de résolution de KEPLER

CAMELIA a été testé avec succès dans plusieurs domaines du calcul algébrique. L'idée essentielle, à la base de sa réalisation, qui est d'articuler dans un même système calcul et raisonnement, reste d'actualité, puisque cette question est encore loin d'être résolue, même avec les logiciels de calcul formel en vogue aujourd'hui³.

3.2. AMALIA

Le projet AMALIA, présenté en 1987, visait à construire à partir de Camélia, un tuteur intelligent pour enseigner le calcul algébrique à des étudiants de DEUG [Vivet 1987, Vivet 1988a, Vivet et al. 1988a, Vivet et al. 1988b]. L'objectif d'AMALIA était de valider trois idées fondamentales :

1. Le formalisme des plans et des métarègles peut servir à coder des scénarii pédagogiques (partie étapes du plan) adaptés à des situations (partie descripteurs du problème), les méta-règles permettant de choisir un scénario pédagogique. C'est l'idée fondatrice de la planification pédagogique au sein de l'équipe EIAO du LIUM.
2. L'utilisation de métarègles formelles prenant en compte le modèle de l'élève et le contexte de la session peut permettre un contrôle pédagogique de la résolution. C'est l'idée de résolution pédagogique.
3. L'utilisation de bases de connaissances disposant d'un langage de représentation suffisamment riche (plans, métarègles) peut permettre un travail au niveau des explications fournies à l'élève sur la résolution du système.

L'architecture proposée pour la conception d'AMALIA (figure 3) repose sur la coopération de deux systèmes à base de connaissances utilisant le même formalisme de représentation des connaissances pour modéliser à la fois l'expertise du domaine et l'expertise pédagogique. On utilise ainsi le même moteur pour interpréter les plans du domaine et les plans pédagogiques. On remarque (figure 3) que le planificateur pédagogique impose au planificateur de résolution de problèmes du domaine des démarches de résolution adaptées à l'apprenant par activation de métarègles pédagogiques.

Dans les faits le projet AMALIA n'a pas conduit à l'implémentation d'un tuteur en calcul algébrique, mais il a permis de lancer trois défis : l'utilisation de plans pour coder des scénarii pédagogiques, l'utilisation de méta-règles pour arriver à des résolutions "pédagogiques" et la structuration de bases de connaissances pour

3. La grande diffusion des systèmes de calcul symbolique (Derive, Maple, Mathematica) dans le système éducatif conduit à poser de nouveau toutes ces questions. On pourra consulter les actes des journées Calcul symbolique [Lagrange et Lenne 2000].

fournir des explications à un élève. Ces défis ont servi de ciment fédérateur aux travaux des doctorants de l'équipe pendant plusieurs années. Ces travaux ont concerné la gestion pédagogique et l'architecture des tuteurs intelligents, la gestion du dialogue et de l'interaction et enfin la problématique des explications dans les Tuteurs intelligents. Les idées de départ qui sous-tendaient le projet AMALIA ont ainsi été reprises, développées, reformulées, pour certaines abandonnées et pour d'autres sont encore aujourd'hui matière à recherche.

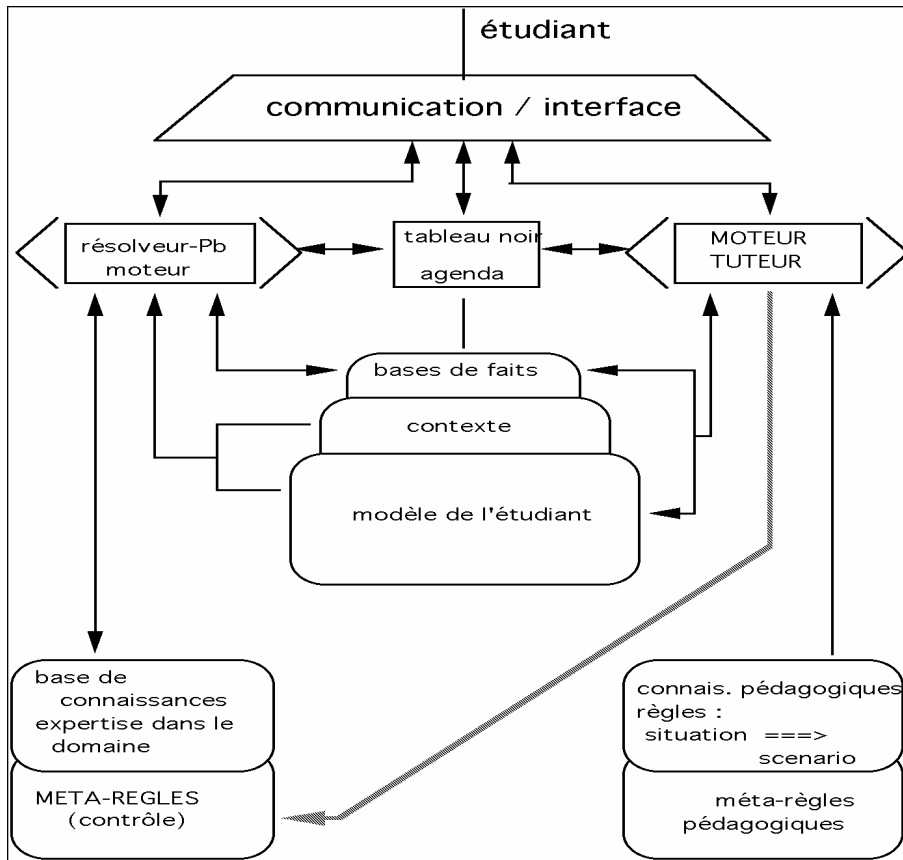


Figure 3. Architecture d'AMALIA

3.3. Gestion pédagogique et architecture des tuteurs intelligents

Dans QUIZ, tuteur intelligent pour l'enseignement des enchères au bridge, Jean-Marc Labat et Michel Futersack, abandonnant le calcul algébrique, ont d'abord conjointement exploré l'idée d'une architecture générique des tuteurs intelligents telles qu'elle était présentée dans le projet AMALIA [Labat et Futersack 1990]. Celle-ci est fondée sur la coopération de deux systèmes experts l'un travaillant sur l'expertise du domaine et l'autre sur l'expertise pédagogique. Ils ont également mis en œuvre l'idée de modéliser l'expertise pédagogique par des plans et des méta-règles. Ces recherches ont été poursuivies par Pierre Jacoboni lors de la réalisation de DIADEME, un système d'évaluation des compétences en électronique destiné à être associé à un tuteur intelligent utilisé dans un contexte d'enseignement à distance.

3.3.1. Architecture des Tuteurs Intelligents

QUIZ propose pour la construction de tuteurs intelligents une architecture multi-agents relevant de l'Intelligence Artificielle distribuée de type modulaire [Futersack 1990]. Il comprend quatre agents hétérogènes ayant chacun son propre espace de travail, son propre langage de représentation des connaissances et communiquant avec les autres par des envois de messages asynchrones. L'agent principal est le module pédagogique qui contient un planificateur pédagogique dynamique (KEPLER ELFE). Ce module gère la session et met à jour un modèle de l'élève. Le deuxième agent est le résolveur de problèmes : c'est un système expert d'enchères au Bridge réalisé en SNARK [Laurière 1986] qui comprend plus de 400 règles d'ordre 1. Le troisième est l'agent explicateur, également un système expert écrit en SNARK. Il est capable de répondre à des questions de type "Pourquoi telle enchère ?" et "Pourquoi pas telle enchère ?". Enfin le quatrième est un générateur de problèmes sous contraintes qui génère des mains de treize cartes.

DIADEME [Jacoboni 1993] reprend ce type d'architecture multi-agents manipulant des connaissances hétérogènes, mais le contexte de l'enseignement à distance a conduit Pierre Jacoboni à concevoir un système distribué alors que les réseaux étaient loin d'être aussi développés qu'à l'heure actuelle. Les travaux sur les architectures multi-agents et multi-agents distribuées seront repris par la suite dans le cadre des environnements d'apprentissage interactifs [Teutsch 1994, Dubourg 1995] et des environnements d'apprentissage ouverts et distribués.

Par rapport aux hypothèses initiales d'AMALIA, deux remarques s'imposent. D'une part les nécessités de la planification pédagogique dans QUIZ et du diagnostic dans Diadème ont amené ces chercheurs à assister le raisonnement de Kepler par l'adjonction d'un moteur d'inférence (ELFE, moteur d'ordre 0 [Futersack 1990] et START moteur d'ordre 1 et 2 [Jacoboni 1993] tous deux inspirés de SNARK). Ce moteur a la charge d'établir des faits pour informer le planificateur pédagogique. Cela permet d'augmenter le caractère dynamique de la planification de KEPLER et introduit une possibilité d'interaction avec l'élève sur les choix pédagogiques.

D'autre part, dans QUIZ, l'expertise d'enchères au bridge nécessite un formalisme de représentation des connaissances différent de celui adopté pour l'expertise pédagogique. Dans Diadème qui ne résout pas à proprement parler des problèmes du domaine mais analyse les réponses des élèves et leur fournit des explications en rapport avec leur réponse, l'expertise du domaine est répartie dans les bases de connaissances de diagnostic et d'explication. Dans ces deux cas, on remarque que l'idée d'un formalisme générique de représentation des connaissances, utilisable sur des problèmes variés, s'est avérée impossible à mettre en œuvre. Des travaux récents en ingénierie des connaissances confirment ces résultats. Tchounikine [Tchounikine 1998, p. 3 et Annexe 1] suggère qu'une "approche interprétative" de l'ingénierie de connaissances selon laquelle l'expertise est interprétée à l'aide de modèles prédéfinis est peu adaptée à la résolution de problèmes lorsque celle-ci doit avoir une plausibilité cognitive, ce qui est le cas dans un tuteur où l'on souhaite obtenir une résolution "pédagogique" signifiante pour un élève. Il propose dans ce cas "une approche constructive selon laquelle le modèle conceptuel est essentiellement construit par abstraction de l'expertise des experts du domaine".

3.3.2. *Connaissances et métaconnaissances pédagogiques*

Dans QUIZ, l'expertise pédagogique est représentée de façon déclarative en utilisant le formalisme des plans et des méta-règles [Labat 1990]. Pour assurer la flexibilité de la planification pédagogique, Jean-Marc Labat distingue le niveau stratégique du niveau tactique. Le niveau stratégique regroupe les choix pédagogiques généraux. Ces choix n'évoluent que lentement et concernent la détermination du curriculum, la stratégie pédagogique principale et le degré d'expertise auquel QUIZ répond à l'apprenant dans les exercices. Le niveau tactique correspond aux micro-décisions que tout enseignant est amené à prendre pendant un cours. Il s'agit de choisir les changements temporaires, les aides, les corrections, les explications qu'il propose à l'apprenant.

QUIZ appuie sa planification sur un modèle de l'apprenant (de type "overlay model") qu'il met à jour au fil des interactions. Ce modèle comporte plusieurs catégories d'informations utilisées à des fins tactiques ou stratégiques : situation générale (nom, âge, formation), domaine cognitif (capacité d'apprentissage, demande d'aide répété, etc.), domaine affectif (objectifs, motivations, etc.), historique général (trace des sessions précédentes).

Cette réflexion autour de l'évaluation des connaissances et l'utilisation d'un modèle de l'élève dans l'interaction a été reprise dans différents systèmes (cf. 4.2) : DIADEME [Jacoboni 1993] MARPLE [Teutsch 1994], REPERES [Dubourg 1995], Pépite [Jean 2000].

4. Dans un "overlay model" ou modèle de l'expertise partielle, les connaissances de l'élève sont considérées comme formant un sous-ensemble des connaissances expertes représentées dans le système.

Notons que le module pédagogique de QUIZ impose au résolveur de problèmes du domaine un niveau d'expertise correspondant à une résolution pédagogique adaptée au niveau de l'apprenant. Dans QUIZ deux niveaux ont été définis : un niveau expert et un niveau débutant.

QUIZ représente une tentative pour valider les premières idées d'AMALIA. C'est en fait le seul système développé au LIUM qui ait exploré le paradigme des tuteurs intelligents dans son ensemble puisque le prototype prend en charge des sessions complètes et que chaque module a été en partie développé. De manière plus précise, pour chacun d'entre eux, une expertise couvre un certain nombre de situations, expertise qu'il aurait fallu étendre pour faire face à des situations plus variées. Le travail réalisé a permis de mettre en lumière des problèmes sur chaque composante et sur leur intégration, problèmes qui ont ensuite été approfondis dans d'autres recherches comme nous le verrons dans la suite de cet article. En particulier Robert Chevallier [Chevallier 1994] a repris, en la posant différemment, la problématique introduite par Jean-Marc Labat d'assurer une cohérence dans les interventions d'un tuteur intelligent entre une interaction ponctuelle du système et l'ensemble du dialogue au niveau de la session.

3.4. *Le dialogue et l'interaction dans un tuteur intelligent*

Dans sa thèse, R. Chevallier a abordé la planification pédagogique sous l'angle de la gestion d'un dialogue entre l'apprenant et le système. STUDIA [Chevallier 1992a, 1992b] est un EIAO qui met en œuvre les interactions système/apprenant par le développement d'un modèle de dialogue homme/machine autour de la résolution d'un problème de statistique.

En se fondant sur les travaux en linguistique de "l'école Genevoise" [Roulet et al. 1985] et sur leur analyse hiérarchique et fonctionnelle du dialogue, Robert Chevallier définit un modèle relativement général structuré en deux niveaux : un niveau de structuration pédagogique où interviennent des stratégies pédagogiques et un niveau de structuration dialogique où interviennent des stratégies interactives et de discours. Le modèle de dialogue implémenté dans ce système repose sur les notions d'intervention, d'échange, de négociation et de plan. Les plans de STUDIA sont constitués d'une succession de tâches à proposer à l'apprenant dont une partie est déterminée par la prise en compte d'informations échangées lors du déroulement du dialogue, ce qui confère au modèle son caractère dynamique.

STUDIA est un système plutôt directif qui ne remet pas en cause un plan une fois qu'il a été choisi. Par contre une négociation entre l'étudiant et le système peut donner lieu au déclenchement d'un autre plan. Cette directivité dans l'interaction est cohérente avec l'objectif visé qui est d'entraîner à une démarche très structurée et

prescriptive de résolution de tests paramétriques. Du point de vue de l'étudiant, elle est acceptable car elle est tempérée par les capacités de négociation et d'explication du système. Notons que STUDIA est un système utilisé par son concepteur auprès de ses étudiants sur des séances de deux heures environ.

Le projet REPERES [Dubourg 1995] a repris, hors du paradigme des tuteurs intelligents, le formalisme de plans et des méta-règles pour gérer un double niveau d'interaction global et local en partageant l'initiative entre le système et l'élève.

Dans le domaine du dialogue, Dominique Lenne, s'inspirant également des travaux de l'école genevoise, a approfondi certaines notions comme le point de vue et la prise d'initiative. Le modèle de dialogue du système DISCO [Lenne 1995] considère trois points de vue complémentaires : le point de vue "donnée" qui concerne le problème et la méthodologie, le point de vue "théorie" relatif aux concepts, propriétés et formules et le point de vue "outils" relatif aux procédures du domaine (statistiques) et aux procédures logicielles. Chaque point de vue a ses propres méthodes et sa propre terminologie pour désigner les mêmes objets. Des connaissances de contrôle sont nécessaires pour passer d'un point de vue à l'autre dans le cours du dialogue.

Un des thèmes abordés par STUDIA et qui est récurrent dans toutes les recherches sur les TI est celui des explications que les systèmes à base connaissances sont censés pouvoir donner à l'apprenant. C'est la troisième idée forte du projet AMALIA.

3.5. L'explication dans les tuteurs intelligents

L'idée de Martial Vivet en 1987 [Vivet 1987] était qu'en présentant à l'élève une reformulation de la trace de CAMELIA, AMALIA pourrait présenter une solution à l'élève. En raisonnant sur la succession des plans choisis, le système pourrait alors commenter la résolution et en raisonnant sur la trace des méta-règles il pourrait justifier la résolution. Cette question des explications, telle qu'elle a été initiée par Martial Vivet⁵, a été abordée très souvent par les doctorants de l'équipe ; la thèse d'Élisabeth Delozanne y a été en grande partie consacrée.

Dans QUIZ, l'agent explicateur est un des quatre agents principaux du tuteur. Conformément à l'approche qui commençait à être acceptée dans la communauté IA intéressée à ces problèmes [Bouri et al. 1990, Kassel et al. 1986] et qui prévaut

5. Reprenant sans doute un thème important au sein de l'équipe de Jacques Pitrat [Pitrat 2000 dans ce volume] dans l'idée de représenter de manière explicite des méta-connaissances dans le domaine de l'EIAO.

encore aujourd'hui [Tchounikine 1998], les concepteurs du système considèrent l'explication comme une tâche de résolution de problèmes à partir de l'analyse par le système du problème en cours et des difficultés de l'apprenant. Ils ont ainsi réalisé un système expert explicatif qui permet en réponse aux questions "Pourquoi ?" et "Pourquoi pas ?" telle enchère, de fournir des explications que Jean-Marc Labat qualifie de "minimales", la planification pédagogique étant le souci premier des concepteurs de QUIZ.

Constatant que les connaissances utilisées pour la résolution sont insuffisantes pour expliquer (ce qui était déjà à l'époque un résultat bien établi dans la communauté française et internationale s'intéressant aux systèmes experts explicatifs), trois questionnements sur les explications ont émergé de ce travail :

1. De quelles connaissances supplémentaires a-t-on besoin pour expliquer et comment les recueillir ?
2. Comment comprendre le problème rencontré par l'élève quand il demande pourquoi ou pourquoi pas ?
3. Comment prendre en compte le contexte pour ne pas répéter inlassablement la même explication et diversifier les points de vue ?

En d'autres termes se posent les questions du recueil et de la représentation des connaissances explicatives ainsi que celle de la pertinence des explications d'un système expert pour l'apprentissage [Delozanne 1992].

Dans STUDIA, le problème de représentation des connaissances explicatives et de leur recueil n'est pas étudié puisque les explications sont des textes figés. C'est le concepteur des plans d'intervention qui, selon la situation, prévoit les explications. La pertinence des explications est assurée par leur insertion dans des négociations et dans les stratégies de dialogue et d'interaction.

Dans le domaine du calcul formel, deux séries de travaux ont contribué à avancer sur le problème de la représentation des connaissances explicatives et de leur pertinence : les travaux d'Eric Bruillard autour du système CAMELEON [Bruillard 1991] sur l'étude de fonctions au lycée et ceux d'Elisabeth Carrière et Elisabeth Delozanne dans le projet Elise sur le calcul de primitives en premier cycle universitaire. Ils ont en commun de partir d'une problématique de pertinence des explications au niveau didactique pour aborder les problèmes de représentation des connaissances : qu'est-ce qu'un élève apprend en regardant un système expert pédagogique, résoudre, commenter ou justifier sa solution ?

Caméléon se fonde sur une étude critique des résolveurs pédagogiques en calcul algébrique. Au niveau du contrôle de la résolution, ils possèdent peu ou pas de connaissances sur les objets mathématiques qu'ils manipulent. Le langage d'expression des connaissances et le mode de contrôle du raisonnement sont très limités (impossibilité de définir un objet par ses propriétés, de raisonner par récurrence par exemple). Ils obligent à une démarche descendante (buts et sous buts) alors que celle de l'expert correspond plutôt à un "coup d'œil". Ce coup d'œil

est la reconnaissance perceptive de propriétés d'un objet à partir de son expression. Il s'agit de donner du sens aux formules magiques : "on voit que...", "c'est trivial". En conséquence, Éric Bruillard [Bruillard 1998] tente de fonder le raisonnement du système "non pas sur des opérateurs et des méthodes, mais sur les concepts", en reconnaissant tout à fait la difficulté de cette entreprise au regard de l'état de l'art sur la formalisation des connaissances en algèbre. Il suggère de plus que le système soit "auto-explicatif" : c'est son comportement qui tient lieu d'explication sous une forme largement non langagière. Il conseille enfin que l'interaction soit plutôt orientée vers la discussion sur la résolution du système plutôt que vers l'imitation des résolutions de ce dernier.

Pour valider les idées d'AMALIA concernant les explications, Elisabeth Carrière et Elisabeth Delozanne ont d'abord cherché à introduire dans CAMELIA des connaissances pour produire des explications destinées à favoriser un apprentissage du calcul formel. Ces premiers travaux ont montré que les méta-règles de CAMELIA s'avéraient trop liées au fonctionnement de KEPLER pour expliquer des démarches de résolution pour un élève. L'étape suivante de ces travaux a été de chercher à recueillir et modéliser l'expertise d'explication des "bons profs" [Carrière et al. 1990]. Des didacticiens des mathématiques consultés sur ce projet ont répondu sous forme de boutade que pour eux un "bon prof est quelqu'un qui sait se taire". Plus sérieusement, ils ont attiré l'attention sur le fait que l'enseignement ne se limite pas à un échange verbal avec l'apprenant et que l'essentiel est sans doute à rechercher dans l'activité, cette activité permettant à l'élève de donner un sens à ce qui est dit. À partir de là, le projet ELISE s'est constitué en déplaçant la thématique de recherche, des explications vers celle de l'interaction entre l'élève et le système, les didacticiens et les informaticiens travaillant conjointement à la mise au point de "situations d'interaction". L'explication est alors considérée comme un processus : "c'est l'ensemble des interactions entre le système et l'apprenant structuré par les situations d'interactions qui constituent un processus explicatif" [Delozanne 1992].

Un exemple tiré du corpus d'une expérimentation d'ELISE illustre ce processus [Delozanne 1992 p.284-286]. Un binôme de deux étudiants après avoir résolu un problème de calcul de primitives décide, avant de changer d'exercice, de regarder s'il n'y avait pas d'autres démarches possibles (un plan dans le langage d'ELISE). La deuxième solution "raisonnable" proposée par le logiciel les surprend sans qu'ils formulent à haute voix en quoi. Ils cherchent à tester pas à pas la démarche proposée et demandent une explication. Le logiciel affiche une explication en deux parties (une quarantaine de mots soit quatre lignes courtes) : comment appliquer la démarche et pourquoi elle est fructueuse. Les étudiants ne lisent à voix haute que la première partie de l'explication. Leurs échanges ultérieurs montrent que cette première partie répond justement à la question qu'ils se posaient. La suite de leur résolution prouve qu'ils n'ont pas compris du tout à ce moment là pourquoi la démarche est fructueuse. Et pourtant le logiciel le leur avait dit mais, à ce moment là une autre difficulté occultait de leur point de vue cette possibilité d'anticipation. Ils ne comprennent que par la suite après une résolution de type essai-erreur et

concluent par “un ouais ouais bien sûr on se retrouve avec $\sin(\log x)$ ” qui constituait la deuxième partie de l’explication donnée par le système et qu’ils n’avaient pas lue à voix haute. Ces étudiants pensent par ailleurs qu’un des points forts du logiciel est la qualité des explications qu’ils donnent alors même qu’ils n’en ont demandé que deux fois.

Cet exemple montre comment, du point de vue de ces étudiants, l’explication se construit progressivement à partir des questions qu’ils se posent et, sur la durée, dans l’interaction avec le logiciel et entre eux.

Comme nous le verrons dans la section 4.3.b, les différentes situations d’interaction mises au point dans ELISE, visant un enseignement explicite de méthodes⁶, ont pour objectif d’inciter les étudiants à comprendre comment “on pense à”, “on joue sur le fait que”, “on voit que” [Robert et al 1987, Rogalski 1990]. Les objectifs de l’enseignement explicite de méthodes peuvent être rapprochés de préoccupations de chercheur en informatique préoccupés par la modélisation de la résolution de problèmes : Jacques Pitrat parle de “méta-explications” ([Pitrat 2000] dans ce numéro), Éric Bruillard de “coup d’œil” et Martial Vivet de “fonctions perceptives évoluées”.

Ces derniers travaux, tout à fait complémentaires, témoignent d’une approche résolument différente de celle couramment adoptée par les systèmes d’Intelligence Artificielle en calcul formel, tant du point de vue de la représentation des connaissances qu’ils proposent que du point de vue de la pertinence des explications qu’ils pourraient donner. Dans ELISE, comme dans CAMELEON⁷, l’explication est vue *du côté de l’apprenant* comme un processus qui émerge de l’interaction [Séré et Weil Barais 1991] et la conception du système est fondée sur ce point de vue. Ce choix constitue une rupture avec la démarche technocentrée qui prévalait dans AMALIA où “l’objectif est de montrer que l’on peut exploiter à des fins pédagogiques, les potentialités offertes par le système CAMELIA” [Nicaud et Vivet 1988]. Il ne remet pas en cause le fait qu’une représentation déclarative des connaissances et méta-connaissances permet au système d’expliquer sa résolution, mais il remet en cause la pertinence de ces explications pour l’apprentissage sauf à les insérer dans un dispositif interactif qui permet à l’apprenant de leur donner sens.

Le projet AMALIA n’a pas abouti, mais il contenait en germe ce qui, avec le recul, caractérise tous ces travaux fondés sur l’Intelligence Artificielle de la fin des

6. L’enseignement de méthodes, tel que l’envisagent des didacticiens et Marc Rogalski, se distingue de l’enseignement d’une méthode prescriptive comme c’est le cas dans STUDIA. Il ne s’agit pas seulement de dire aux étudiants “ pour résoudre ce type de problèmes faites ceci puis ceci puis ceci ” mais de leur donner des moyens d’analyser le problème et de mettre en relation cette analyse avec les outils de résolution disponibles en se fondant sur l’étude des propriétés des objets du domaine.

7. Et également dans une certaine mesure dans STUDIA puisque, pour Robert Chevallier, l’explication émerge du dialogue, qui est le modèle d’interaction étudié dans ce système.

années quatre-vingts : la recherche du dynamisme des systèmes qui conduit à l'adaptation, à la construction d'explication et à l'apprentissage. Martial Vivet poursuivait parallèlement des recherches sur les micromondes et LOGO dans le cadre de la formation en entreprise. Il estimait en effet nécessaire de mener des recherches dans ces deux voies qu'il considérait comme complémentaires [Vivet 1988b] : l'Intelligence Artificielle d'une part, donnant aux logiciels des possibilités d'adaptation, de planification, d'explication et permettant un travail au niveau cognitif, les micromondes d'autre part, afin d'introduire des activités collaboratives, prenant en compte des aspects moteur, créatives dans les situations d'apprentissage.

4. Les micromondes et la formation professionnelle

Dès la fin des années 70, les entreprises et les pouvoirs publics se sont fortement préoccupés de la reconversion d'un public dit "de bas niveau de qualification" afin qu'il puisse suivre la mutation industrielle et travailler avec de nouveaux processus ou machines automatisées [Parmentier et Vivet 1991]. Concevoir de telles formations, sans qu'il existe de consensus bien établi sur la façon de les mener, constituait un défi intéressant.

Les travaux issus de Papert autour de Logo semblaient offrir un cadre approprié pour mener cette réflexion, et comme nous l'avons mentionné, Martial Vivet a rapidement essayé d'imaginer comment en tirer parti pour l'alphabétisation informatique et technologique d'adultes. Mais si la tortue Logo était bien adaptée pour les enfants⁸, il fallait concevoir d'autres dispositifs technologiques susceptibles de jouer un rôle analogue. En créer de manière ad hoc fut une première piste suivie, mais la rencontre avec le monde des distributeurs de matériel pédagogique en technologie tels que LEGO[®], Fischertechnik[®] et d'autres amena des solutions plus ouvertes et plus intéressantes.

Une équipe⁹ composée de didacticiens, de formateurs professionnels et d'informaticiens a alors travaillé à l'élaboration de matériels, de logiciels et de

8. Papert (1981) présente dans son livre "Le jaillissement de l'esprit" la Tortue LOGO comme "un être interactif que l'apprenti peut manipuler, et qui fournit donc un environnement d'apprentissage interactif. Mais l'apprentissage n'y est pas "actif" seulement dans le sens de cette interaction. L'apprenti, face à ce micromonde, est en mesure d'inventer son propre système d'hypothèses sur ce monde en réduction et les lois qui le gouvernent, et de les amener à se réaliser. Il peut imposer à la réalité une forme à son idée, sur laquelle il travaillera, fera des recherches, durant tout un jour par exemple, et qu'il pourra remodeler, restructurer, rebâtir avec des variantes".

9. Jérôme Bruneau, Paul Delannoy, Olivier Hubert, Pascal Leroux, Jean-Luc Monflrier, Josette Morandea, Christophe Parmentier, Martial Vivet.

méthodes pédagogiques qui ont contribué à la création d'environnements d'apprentissage ouverts destinés à être utilisés dans des stages de reconversion, de remobilisation ou de remise à niveau pour des publics dits "de bas niveau de qualification". Ces environnements sont qualifiés d'ouverts dans le sens où ils ne restreignent ni les activités pédagogiques à un catalogue type, ni les formateurs à un style d'enseignement immuable. L'objectif est d'apporter un maximum de flexibilité et d'ouverture en termes d'apprentissage en fonction des objectifs de la formation, du vécu professionnel des stagiaires, du contexte industriel dans lequel ils travaillent et du contexte de la formation. Il s'agit d'assurer une sorte d'"alphabétisation à l'informatique et à la technologie" fondée sur le principe de prouver à des personnes considérées comme peu qualifiées qu'elles ont capitalisé tout un savoir et un savoir-faire qu'il convient de bien connaître et de maîtriser avant d'évoluer vers un nouveau travail et de nouvelles méthodes.

La création de supports et d'activités pédagogiques originaux rassemblés dans une méthode pédagogique appelée Atrium (présentée dans la section 3.4), ainsi que les expérimentations effectuées avec des stagiaires d'entreprise, telles que celle réalisée en 1984 dans l'entreprise Renault [Vivet 2000a] constituent les résultats importants des travaux menés à partir desquels la conception et le développement de nouveaux EIAO en technologie (cf. 4.3) se sont appuyés.

4.1. Supports pédagogiques : du micro-robot modulaire aux ateliers flexibles

Alors que le propre d'un robot industriel est d'être adapté à sa fonction de production, le rôle d'un robot pédagogique¹⁰ est d'amener les apprenants à découvrir la technologie, à apprendre de nouvelles connaissances mais pas nécessairement de produire. Par conséquent, l'utilisation systématique de matériel industriel de production pour enseigner la technologie ne semble pas utile à priori. La plupart des connaissances technologiques peuvent être introduites à l'aide de robots pédagogiques meilleur marché offrant plus de sécurité et, par là même, donnant à l'apprenant le droit à l'erreur.

Toutefois, il n'est pas souhaitable de déconnecter le support pédagogique utilisé et le milieu industriel dans des contextes de formation avec des ouvriers travaillant en production. Le problème fondamental est alors de définir des réductions intéressantes : le robot pédagogique doit être un objet technique physique manipulable fiable, réduction aussi voisine et signifiante que possible des procédés et machines automatisées réellement utilisés en milieu industriel.

10. Le terme générique " robots pédagogiques " fait référence à des modèles réduits de bras manipulateurs et autres systèmes automatisés.

Trois types de supports pédagogiques ont été utilisés dans les environnements d'apprentissage développés dans le contexte de la formation professionnelle.

Les *micro-robots modulaires*, pilotés par ordinateur, sont construits à partir du montage de briques¹¹ d'assemblage ou de modules spécifiques tels que des effecteurs et des capteurs. L'intérêt de ce type de matériel réside dans la diversité des briques, la rapidité de construction de maquettes et la transparence des mécanismes. La diversité des pièces permet, en se limitant à des mécanismes simples (uniquement composés de translations et de rotations), de construire des objets techniques représentant à leur échelle des processus industriels.

Les *bras manipulateurs pédagogiques* ont pour vocation d'amener les apprenants à acquérir des savoir-faire en matière de pilotage de robot en s'exerçant sur du matériel pédagogique. Ces bras sont structurellement assez proches des robots industriels. Contrairement aux micro-robots modulaires, ils ne peuvent pas être démontés et sont peu, voire pas du tout, transparents pour l'utilisateur. Le pilotage est assuré soit à partir de logiciels spécifiques au robot manipulé soit par l'intermédiaire d'un boîtier de commande.

Les *ateliers flexibles miniaturisés* permettent d'introduire les notions liées à la production (par exemple planifier, programmer puis suivre une production, définir une gamme d'usinage, etc.). Avec l'AFX, qui tient sur une table, l'exécution d'une fabrication se traduit par un déplacement de lots de pièces à produire d'une machine à l'autre en fonction des gammes d'usinage établies et du flux de la production. Cette exécution réelle de la fabrication s'accompagne d'une simulation à l'écran de la fabrication. L'intérêt est ici de faciliter une vision globale permettant d'appréhender les notions de flux, de synchronisation et d'établir un parallèle entre ce qui se passe sur un écran et le monde réel. Pour des ouvriers non habitués à la lecture d'écrans, c'est l'occasion d'apprendre à les lire et surtout de faire confiance à ce qui est inscrit sur l'écran. À certaines occasions, est employé un autre type d'atelier tel que le système de production flexible (SPF) [Baudry et Schoes 1989] qui tient dans une salle de 50 m². L'intérêt pour les stagiaires est de pouvoir programmer et de suivre une production en grandeur nature. Ils sont confrontés à des problèmes analogues à ceux rencontrés dans l'industrie. Ils doivent les résoudre mais sans être aussi contraints qu'ils le seraient en production. Ces ateliers flexibles, peu nombreux dans les lycées, sont utilisés dans le cadre de l'enseignement technique et de formations professionnelles en productique.

L'étendue de la gamme des supports pédagogiques offre un éventail d'activités tout à fait intéressant pour les formations et les stagiaires.

11. Comme par exemple Fischertechnik[®] ou Legodacta[®].

4.2. Un large éventail d'activités pédagogiques

Toutes les activités qui vont être décrites sont organisées pour des sessions regroupant les stagiaires par deux ou trois, choix important car il oblige les membres des groupes à collaborer pour accomplir les tâches demandées. Ces activités dépendent en grande partie des supports pédagogiques. Pour les micro-robots modulaires quatre classes principales ont été définies :

— Le pilotage de micro-robots pré-assemblés tels que le chariot de cariste. Les stagiaires disposent des commandes de pilotage de la machine et abordent des exercices simples de résolution de problème, par exemple déplacer le chariot dans un labyrinthe ou déplacer une palette de boîtes d'allumettes.

— La construction d'un micro-robot à partir d'une notice de montage. Les apprenants lisent une documentation, interprètent les schémas d'assemblage et de câblage électrique dans le but de monter une maquette dont ils programment par la suite les mouvements.

— La conception d'un micro-robot à partir d'un cahier des charges décrivant les fonctions spécifiques attendues. Cette activité est conduite sur le mode des projets industriels. La plupart des projets qui ont été animés par des membres de l'équipe en formation ont eu pour thème la conception d'une trieuse de pièces de monnaie de 1 franc et de 20 centimes. Plus de trente trieuses ont été conçues jusqu'à maintenant, témoignant d'une grande variété tant dans la morphologie que dans les performances, même si parfois le principe de tri est le même. On voit ici un des aspects importants des environnements d'apprentissage ouverts. Ils créent un contexte pédagogique qui permet un épanouissement de l'imagination de l'enfant ou de l'adulte.

— La réception des machines produites. *“La réception correspond à une séance de travail collectif au cours de laquelle les productions sont exhibées devant le groupe et éventuellement un jury. En particulier, chaque groupe doit expliciter les fonctionnalités de la machine produite et vanter les mérites de sa réalisation. C'est avant tout une épreuve de communication permettant une reformulation des problèmes rencontrés et des solutions apportées. C'est un acte pédagogique qui doit être parfaitement maîtrisé par le maître et si jury il y a, il doit être au service de la formation”* [Vivet 1993]. Cette réception est un excellent exemple “d'institutionnalisation” de la connaissance construite. L'objet de connaissance prend une dimension sociale importante, devient un objet de référence [Brousseau 1987]. L'expertise par un jury extérieur à la formation est prétexte à la rédaction de rapports écrits sur les machines et à la préparation d'une soutenance avec un argumentaire solide comme si les stagiaires en alphabétisation informatique et technologique devaient vendre leurs machines.

Toutes les activités précédentes intègrent une tâche très importante dans ce contexte de formation, la programmation. Sans programme les robots sont

impuissants. Tout environnement de programmation dédié au pilotage des micro-robots modulaires [Delannoy 1996] et tout langage de programmation incluant les primitives de pilotage liées au matériel peuvent être utilisés. LOGO fut le premier environnement intégré dans les environnements d'apprentissage développés au sein de l'équipe pour la formation technologique. Par la suite, sur la base des expériences effectuées, un EIAO complètement dédié à l'alphabétisation informatique et technologique a été développé : ROBOTEACH (cf. section 4.3).

D'autres activités sont bien sûr envisageables : parmi celles-ci le diagnostic de pannes, la réparation de mécanismes défectueux, le débogage de programmes de pilotage, etc.

En ce qui concerne les bras manipulateurs pédagogiques, les activités se limitent au pilotage en mode direct et à la programmation de trajectoire. Le spectre des activités possibles est également étroit avec les ateliers flexibles. L'imagination laisse ici la place à l'étude d'un matériel proche de celui de l'industrie et à la mise en pratique de méthodes industrielles comme la gestion et le suivi de production. Sur ce type d'atelier, les stagiaires programment la production et lancent des fabrications. La simulation de fabrication sur l'AFX ou la fabrication réelle avec le SPF, permettent aux stagiaires d'avoir un avis critique sur les choix qu'ils ont faits.

L'ensemble des activités décrites ici place les apprenants dans un contexte de résolution de problèmes presque permanent. La diversité de ces activités permet aussi de viser l'acquisition d'une multitude de compétences dont voici les principales.

4.3. Les compétences visées

Parmi les activités précédemment citées, la construction de micro-robots permet de travailler à l'acquisition de compétences techniques telles que la compréhension de schémas d'objets techniques, la précision dans l'application d'un plan de montage, le diagnostic de pannes, la maintenance, mais aussi l'organisation de l'espace et du temps, la localisation dans l'espace, la dextérité.

L'imagination, l'invention, le raisonnement inductif sont difficiles à solliciter dans des situations d'apprentissage traditionnelles. Le projet relatif à la conception de micro-robots modulaires le permet tout comme il facilite le travail de compétences d'ordre linguistique (écriture de rapports techniques, présentation et argumentation orale). Toute expérience vécue n'est vraiment aboutie qu'à partir du moment où elle peut être partagée. Ce partage n'est possible qu'en communiquant par l'écrit et l'oral. Les stagiaires maîtrisent parfaitement leurs micro-robots puisque ce sont eux qui les ont conçus, assemblés et programmés. Personne d'autre ne peut en parler mieux qu'eux. Cette maîtrise de l'objet est un formidable déclencheur pour

susciter l'écriture ou la présentation orale pour des publics a priori réticents. Ce type de déclencheur constitue un autre intérêt des environnements d'apprentissage ouverts mis en place.

Dès qu'il s'agit de piloter un micro-robot ou un bras manipulateur pédagogique voire de planifier une production, des compétences générales (par exemple la création de programmes, l'anticipation, l'organisation et la planification d'une série d'événements) sont implicitement mobilisées et même perfectionnées. En effet, les apprenants sont dans un contexte où ils manipulent des objets réels dont ils comprennent le fonctionnement et qu'ils veulent faire bouger (l'aspect ludique des objets renforce la motivation). Ils sont, par conséquent, "obligés" d'écrire des programmes corrects pour aboutir. L'utilisation d'objets réels tels que les micro-robots est très bien adaptée pour l'initiation à la programmation [Leroux 1996, Delannoy 1994].

La gestion des interactions sociales dans un groupe n'est pas une compétence explicitement visée mais elle est intrinsèque à la méthode pédagogique car toutes les activités sont réalisées en groupe d'au minimum deux ou trois personnes. Il est nécessaire pour chacun de collaborer avec autrui pour arriver à concevoir quelque chose en commun. La motivation première étant la résolution du problème, la communication avec autrui se fait alors naturellement et il est plus facile de la travailler voire de la corriger.

Manipuler des modèles [Vivet 1989, Vivet 1991b] est également intéressant et plus facilement abordable dans ce contexte d'apprentissage avec des objets réels. Il s'agit ici de développer des aptitudes :

- à apprécier les relations (ressemblances, différences) entre ce qui arrive dans le monde réel et dans le modèle de représentation du monde réel,
- à anticiper en se fondant sur ces relations,
- à être dans l'incertitude et à explorer à partir de cette incertitude.

Cette section s'est limitée à la présentation des compétences en lien avec les activités définies plus haut. Elles ne sont pas travaillées au hasard mais dépendent de la situation d'apprentissage définie par le formateur. Cette réflexion pédagogique se trouve exprimée dans la méthode Atrium.

4.4. La méthode Atrium

Cette méthode a pour objet de définir, pour une situation d'apprentissage, les compétences visées, les activités à mettre en place et déterminer les outils qui supporteront les activités en adéquation avec les compétences à acquérir. La

méthode est résumée sous la forme du schéma de la figure 4. Sur le premier axe sont portées les différentes compétences possibles à appréhender dans le contexte de robotique pédagogique. Le deuxième axe précise les activités que les apprenants peuvent mener en fonction des compétences définies sur l'axe précédent. Le dernier axe donne la liste des outils à utiliser pour les différents types d'activité prévus.

Les correspondances qui existent entre les axes (liens représentés par des traits sur les axes) facilitent la définition de la situation d'apprentissage. Par exemple, si l'objectif est de travailler la compréhension de schémas techniques, il convient de mettre en place une activité de construction d'un micro-robot modulaire à partir d'un plan de montage. Si le but est de développer le sens de l'anticipation, une activité de suivi de production sur un AFX est appropriée.

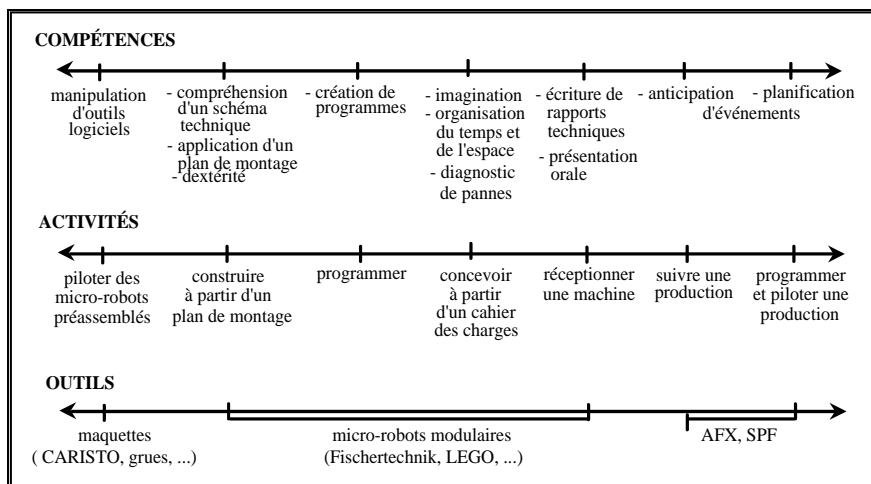


Figure 4. La méthode pédagogique Atrium

Le schéma de la figure 4 ne se veut pas exhaustif mais représente le support de la méthode. L'important se situe au niveau des trois axes et des liens de correspondance qui existent entre ces axes. Le contenu des axes peut varier en fonction du formateur, du matériel qu'il a à sa disposition, du public avec lequel il travaille, du contexte de formation (enseignement scolaire ou formation professionnelle), etc.

La méthode Atrium définit un cadre pédagogique général dont la vocation principale est de mettre en place des environnements d'apprentissage ouvert dans lesquels des activités d'alphabétisation à l'informatique et à la technologie peuvent

être menées. Les robots pédagogiques manipulés, les logiciels utilisés, le contenu des activités, les interactions entre les groupes d'apprenants, les ressources sont déterminés par le formateur avant les séances en fonction des objectifs pédagogiques et du type de public visé (par exemple entre hommes et femmes, ouvriers et cadres, etc.). La méthode repose en partie sur le rôle de l'interaction sociale dans l'apprentissage et sur la construction des connaissances par les apprenants.

L'ensemble des travaux de recherche en formation professionnelle est intégré aux savoirs et du savoir-faire en ingénierie éducative de l'équipe EIAO du LIUM. Ces travaux sont régulièrement l'objet de dissémination dans le monde de la formation professionnelle en milieu industrielle et de transfert de technologie éducative¹². La première reconnaissance s'est principalement faite par l'intermédiaire de deux projets de recherche appelé Quadrature [Parmentier et Vivet 1991, Vivet et al. 1991b] et Plume [Parmentier et al. 1993]. Le premier s'est déroulé dans le contexte d'une grande entreprise de sous-traitance automobile et le deuxième dans une entreprise familiale de production de médailles dans le Saumurois.

4.5. Résultats et limites

Les projets Quadrature et Plume ont montré l'intérêt d'utiliser la méthode Atrium en amont de formations professionnelles qualifiantes en particulier avec des personnels dits de "bas niveau de qualification". Grâce aux micro-robots modulaires, les stagiaires ont pu mobiliser leur savoir-faire acquis après vingt ans de production notamment en réalisant des machines intégrant des techniques observées dans l'usine. La stratégie pédagogique a consisté à s'appuyer sur leur vécu professionnel afin de mieux structurer leurs connaissances. Cette (re)structuration faite, l'hypothèse émise est qu'il leur a été plus facile d'acquérir de nouvelles connaissances et compétences en particulier au cours des autres activités avec des supports pédagogiques plus proches du monde industriel (AFX, SPF et bras manipulateurs). Cette deuxième catégorie d'activités a permis d'introduire de nouveaux savoir-faire en productique et par conséquent de commencer à préparer les stagiaires à leurs futurs rôles dans l'entreprise.

12. Par exemple, la participation du LIUM au programme européen MedCampus dans le cadre de deux écoles d'été internationales " on computer-based cognitive tools for teaching and learning " tenues en 1994 et 1995 en Turquie avec la collaboration de six universités européennes.

Un autre effet bénéfique de cette approche pédagogique a été observé sur la motivation des stagiaires. Leur participation fut active tout au long de la formation ce qui n'était pas le cas pour des formations antérieures réalisées dans l'entreprise autour d'activités plus traditionnelles en français, mathématiques et culture générale.

Si l'efficacité pédagogique d'Atrium a été attestée et l'utilisation des micromondes dans un contexte de la formation professionnelle reconnue, les chercheurs de l'équipe ont constaté, lors des expériences Quadrature et Plume, une limite dans l'utilisation des dispositifs d'apprentissage qui se traduisait par une "*sursollicitation*" du formateur [Leroux 1993]. Cette dernière intervient surtout dans les phases de programmation des mouvements des micro-robots. Même s'il est essentiel dans le cadre de pilotage de robots d'accéder à certains concepts liés à la programmation¹³, l'activité de programmation reste difficile pour un certain nombre de personnes et ce n'est pas l'objectif premier de la formation. Dans ces situations, le soutien du formateur est indispensable pour mener les activités à leur terme.

La charge d'activité du formateur, qui doit répartir son temps entre les divers groupes de stagiaires, devient parfois si forte qu'il lui est difficile d'intervenir au moment qu'il juge le plus opportun pédagogiquement, source d'efficacité pour les apprentissages. Il est alors important de réfléchir au rôle du formateur dans les environnements d'apprentissage en lien avec les logiciels d'apprentissage développés et aux moyens de l'assister informatiquement dans ses tâches pédagogiques. L'émergence de ce problème a conduit les chercheurs, au début des années quatre-vingt-dix, à opérer une synthèse des démarches tuteurs intelligents et micromondes dans le cadre de ce qui commençait à s'appeler EIAO dans le sens "environnements interactifs d'apprentissage avec ordinateur".

5. Les Environnements Interactifs d'apprentissage avec Ordinateur et la modélisation de situations d'apprentissage

La reconnaissance de l'aspect primordial de l'activité de l'apprenant, la prise en compte du rôle du maître dans la modélisation des situations d'apprentissage, la nécessité d'introduire de l'assistance au formateur dans les environnements d'apprentissage, les difficultés de modélisation "générique" dans la conception des tuteurs intelligents, vont notablement infléchir les approches développées au dans notre équipe. Cette évolution se situe dans un contexte général où des critiques vis-à-vis des recherches autour des tuteurs intelligents aussi bien sur leurs présupposés

13. Par exemple, il est utile que chacun comprenne que la flexibilité d'une application (évolution des mouvements d'un robot, prise en compte de sécurités, changement dans les gammes de fabrication, etc.) est liée à la programmation.

théoriques que sur leur manque de résultats tangibles (en termes d'usage en contexte réel) se font pressantes.

Cette remise en question se traduit dans le changement de sigle de la communauté française : EIAO devient Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur au début des années 90 [Baron *et al.*, 1991]. L'accent se porte davantage sur l'apprentissage que sur l'enseignement automatique. Bien sûr, les deux vont de pair mais les capacités de résolution et d'explication de la machine s'étant révélées insuffisantes pour l'apprentissage, les recherches se centrent davantage sur les besoins de l'apprenant. L'interactivité et l'interaction deviennent centrales dans les recherches plus que l' "intelligence du système" ou le caractère déclaratif ou non des connaissances de la machine. "L'interactivité a une signification forte qui recouvre d'une part les activités qu'ils [les environnements d'apprentissage] permettent à un apprenant et, d'autre part, leurs capacités d'intervention pertinente et d'adaptation à un utilisateur [Baron *et al.*, 1991]".

Les chercheurs du domaine sont alors amenés à intégrer à leurs problématiques d'Intelligence Artificielle des problématiques issues des recherches en communication homme-machine¹⁴ et en ergonomie des logiciels interactifs [Spérandio 1993, Caelen 1998 RIHM vol 1/1] en particulier en ce qui concernent les méthodes de conception et d'évaluation "centrées utilisateur", les modélisations conceptuelles des interfaces utilisateur et les modélisations des tâches et de l'activité [Nardi 1997, Mackay *et al.* 1998].

Sans abandonner les pistes précédemment suivies dans l'équipe EIAO du LIUM, la manière de les aborder évolue. Centrer les recherches sur l'apprenant et son activité amène à s'interroger sur l'ensemble du dispositif d'enseignement auquel participe le logiciel et notamment sur la place de l'enseignant dans ce contexte.

Les recherches sur LOGO ont montré que l'intérêt de son usage en classe reposait beaucoup sur la qualité de l'enseignant¹⁵. Les tuteurs intelligents quant à eux, conçus dans une vision de substitution du maître, s'exonéraient théoriquement de cette contrainte, mais aucun d'entre eux n'assumait vraiment ce rôle de manière convaincante. Dès 1990, au Nato Advanced Research Workshop "New directions for ITS", Martial Vivet s'interrogeait sur le rôle du professeur (humain) dans les tuteurs intelligents [Vivet 1990, Vivet 1991a]. Ce thème était tout à fait original dans la communauté EIAO et AIED. Il affirmait que le contexte d'usage est plus large qu'une simple machine et un apprenant isolé. Ceci a déterminé deux pistes de travail : tenir compte de l'enseignant dans la conception d'un système, lui assigner un rôle, mais également réfléchir à la conception d'instruments spécifiques qui lui

14. Ce rapprochement a été clairement marqué au LIUM par la mise en place par Martial Vivet en 1995 d'un DEA communication homme-machine et Ingénierie Educative.

15. Considéré autant comme une faiblesse du dispositif que comme un point essentiel à prendre en compte (Vivet, 1980).

sont directement destinés. C'est toute la question de la modélisation de la situation d'apprentissage mettant en scène les apprenants, le professeur et les dispositifs d'apprentissage, qui est posée.

Dans cette perspective, les travaux de notre équipe sont intéressés au concept de "situation d'apprentissage" et se sont penchés sur les activités proposées aux apprenants et à leur insertion dans ces situations d'apprentissage. "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 que nous présentons dans cette section, se sont ainsi centrés sur le rapport entre les outils logiciel proposés et les connaissances construites par les élèves. Ces recherches ont défendu l'idée de création d'un système de spécifications des situations d'apprentissage relié à des processus d'évaluation des environnements ainsi conçus. La suite de cette section concerne la présentation de recherches sur l'évaluation des compétences des apprenants. Nous terminons ce tour d'horizon par des travaux de l'équipe sur la coopération et l'assistance au formateur dans des environnements distribués et sur le traitement automatique des langues.

5.1. Dimensions didactiques et cognitives de l'interaction

Centrer les recherches sur l'apprenant et son activité, c'est mettre l'accent sur les processus même d'apprentissage. Expliciter les connaissances à enseigner et les connaissances construites par les élèves en rapport avec l'enseignement qu'ils ont reçu fait partie des objets d'étude des différentes didactiques des disciplines. C'est notamment le cas de l'école française de didactique des mathématiques, qui accorde une importance primordiale à l'activité mathématique des élèves et à la création de situations d'apprentissage. A partir de la fin des années 80, de nombreuses recherches en EIAO vont s'appuyer sur une coopération étroite entre cette communauté et des chercheurs en Intelligence Artificielle. Au sein de notre équipe, ce sont principalement les travaux menés dans le domaine de l'enseignement des mathématiques, de la robotique pédagogique et des langues qui vont conduire à la remise en cause des architectures classiques des tuteurs intelligents au profit d'une modélisation de situations d'apprentissage.

Cette évolution se traduit par de nouvelles orientations dans la conception des systèmes. La structuration du domaine à enseigner (celle de l'expert) prend une importance moindre, au profit d'une réflexion sur les activités proposées à

l'apprenant et le sens qu'il peut leur accorder. Le but du concepteur n'est plus de trouver une structuration "optimale" de l'ensemble des connaissances à enseigner, une sorte de modèle du domaine, ni de tenter de contrôler le parcours de l'apprenant dans l'espace ainsi organisé. Il est plutôt de mettre en scène des connaissances en situation, de façon à ce qu'un apprenant se les approprie et de favoriser ce processus de construction. En conséquence, l'interaction n'est plus envisagée ponctuellement en rétroaction immédiate mais repose sur une vision plus globale des compétences à acquérir ou des compétences construites par l'élève. L'explication, du point de vue de l'apprenant, est alors, comme nous l'avons écrit précédemment, un processus qui se construit dans l'interaction.

Ces préoccupations ont conduit à l'élaboration d'une méthodologie de conception pluridisciplinaire centrée sur l'activité de l'apprenant et à l'établissement de spécifications de l'interaction à l'aide d'un modèle qui permet l'élaboration de situations destinées à renforcer mais aussi à déstabiliser des connaissances.

5.1.1. Une méthode de conception itérative centrée utilisateur

Un processus de conception particulier s'est peu à peu affirmé au fil des projets qui se sont succédés. Il repose sur un travail interdisciplinaire, sur l'élaboration de maquettes et sur des tests précoces auprès d'utilisateurs (enseignants et apprenants) et s'effectue "en spirale" [Bruillard et Vivet 1994]. On peut le résumer dans les cinq règles méthodologiques suivantes.

- Règle n°1 : Partir d'un problème d'enseignement et, si possible, d'une analyse didactique
- Règle n° 2 : Travailler au sein d'une équipe composée d'informaticiens, de didacticiens et d'enseignants et ce, dès les premières phases de conception du projet
- Règle n°3 : Utiliser le modèle de situation d'interaction et construire des maquettes pour aider à établir les spécifications du système à construire.
- Règle n°4 : Evaluer ces maquettes le plus tôt possible auprès des deux catégories d'utilisateurs : enseignants et étudiants ou élèves
- Règle n° 5 : Centrer la conception sur les interactions apprenant – système (ou sur les interactions médiées par le système, des apprenants entre eux) et les spécifier en fonction des objectifs d'apprentissage pour l'apprenant et en fonction de la situation d'apprentissage.

La règle n°1 préconise une démarche qui part d'un problème d'enseignement pour forger, si possible sur la base d'une analyse didactique, des outils, des modèles et des méthodes pour le résoudre. En effet, dans l'optique de concevoir des environnements d'apprentissage réellement "utilisables", il nous paraît

indispensable de fonder leur conception sur une analyse cognitive et épistémologique du domaine, du public cible, et des difficultés rencontrées habituellement par les apprenants.

Le fait de s'appuyer sur un problème éducatif attesté n'est pas suffisant, un travail informatique de bonne qualité risquant d'être annihilé par une analyse didactique défailante. La qualité de cette analyse didactique apparaît en effet essentielle. Elle n'est cependant pas toujours disponible. Selon les cas, elle peut préexister à la conception du dispositif informatique, elle est alors affinée, approfondie et systématisée voire modifiée lors de la conception de l'EIAO (ELISE, REPERES, PEPITE). Sinon, elle est co-construite au sein de l'équipe de recherche (ROBOTEACH, MARPLE, SAMPRAS, CGSE, GD.Visu@I). Dans tous les cas, il n'est pas possible de partir d'un modèle général qu'il suffirait d'instancier à un contexte particulier puisque le choix et la définition même des activités reposent sur des conceptions pédagogiques et didactiques et dépendent des potentialités des dispositifs techniques que l'on introduit.

La règle n°2 vient en complément de la première. La détermination de la place des enseignants mérite quelques précisions. Ils ont un rôle très important à jouer dans la définition des scénarios d'utilisation et de l'analyse des besoins. De plus leur présence dans l'équipe de conception, si elle ne garantit pas l'acceptabilité du système futur par l'ensemble de leurs collègues, la favorise. En effet, la validation de l'expertise didactique par la communauté scientifique ne garantit en rien l'acceptation par les enseignants de cette expertise et son intégration aux pratiques enseignantes¹⁶. Travailler avec les enseignants facilite la dissémination des résultats de la recherche et permet à l'équipe d'avoir accès à des élèves très tôt dans la phase de conception pour des tests d'utilisabilité, des tests sur des alternatives de conception ou sur la vérification de l'adéquation au contexte d'utilisation.

Toutefois, fonder un logiciel sur la seule expertise des enseignants du terrain est difficile et périlleux. Comme la plupart des experts d'un domaine, leur expertise est plus fréquemment exprimée en termes opérationnels liés à des situations plutôt qu'en terme de modélisation. Une analyse rétrospective sur le processus de conception d'ARRIA [Bruillard et Vivet 1994] le montre bien. Ce logiciel, consacré à l'apprentissage de la rédaction de démonstrations en mathématiques, a été conçu sur la base d'un scénario pédagogique primé dans le cadre d'un concours organisé par le ministère de l'éducation. Partant d'un problème auquel ils étaient confrontés, des enseignants proposaient de réaliser un logiciel permettant aux élèves de construire l'enchaînement logique d'un raisonnement à partir de fragments fournis. Si le scénario semblait marcher correctement sur un exemple décrit sur le papier, sa réalisation informatique a rapidement mis en évidence ses approximations et ses faiblesses. D'une part la conception d'un résolveur chargé de vérifier en temps réel

16. L'exemple de DIADEME que nous reprenons en 4.2, met ainsi en évidence le problème de l'acceptation d'une expertise particulière par d'autres enseignants.

les réponses de l'élève et de lui prodiguer des messages d'aide et d'erreur adaptés s'est révélée très ardue, posant des problèmes redoutables sur les types de rédaction admissibles. D'autre part, l'activité de l'élève n'était pas vraiment décrite et devait être précisée. Un cycle de développement de prototypes et de discussions avec un des enseignants sur ces prototypes a permis de converger vers un produit, mais en modifiant considérablement le scénario initial. On peut dire que le scénario a pu jouer "le rôle de document non contractuel permettant d'induire des spécifications plus générales pour guider le développement". Un processus de conception itératif s'est révélé être le seul envisageable pour arriver à un résultat acceptable.

En ce qui concerne le maquetage ou le prototypage, la règle 3 vient d'être illustrée. L'interaction entre les acteurs de la conception sur les prototypes construits est essentielle dans une équipe pluridisciplinaire. L'informatique modifie le rapport aux objets de savoir et un travail préalable est d'analyser le nouveau contexte de représentation et d'activité. La conception des systèmes Elise, Repères et Pépite qui ont allié le prototypage à l'utilisation d'un modèle de spécifications pour concevoir les activités illustre cet aspect fondamental dans la conception coopérative avec les didacticiens. La thèse de Stéphanie Jean [Jean 2000] appuyée par des travaux de DEA de didactique des mathématiques a bien étudié les effets à la fois producteurs et réducteurs de l'introduction d'un logiciel sur les manifestations de la compétence algébrique des élèves en particulier en ce qui concerne la production d'expressions algébriques. Cette méthode de travail permet de fonder une culture commune à partir de la réalisation et du test de bibliothèques de méthodes et de procédures de construction de matériel iconographique (objets de base non seulement décrits mais implémentés). Elle constitue la base pour transférer ou plutôt recréer les activités d'apprentissage. Par exemple le travail de Paulo Pavel [Pavel 1999] sur la conception de GD.Visu@1, un environnement distribué interactif destiné à l'apprentissage de la géométrie descriptive, montre bien la nécessité de ré-élaborer le contexte de représentation du savoir de référence compte tenu du fait des ressources interactives pouvant être offertes, sans équivalent hors de l'informatique. C'est le cas notamment des environnements de géométrie dynamique.

La démarche de prototypage tend à se généraliser en génie logiciel dès que la conception d'un système informatique présente un caractère de nouveauté tel qu'il est impossible d'établir des spécifications a priori. Signalons néanmoins que le choix des outils de prototypage n'est pas anodin. L'exemple de REPERES est caractéristique. Il a été développé en Airelles¹⁷ une sur-couche objet de LELISP. Si le choix de cette plate-forme expérimentale de développement s'est avéré très intéressant pour la partie représentation des connaissances, il l'a moins été pour la construction de l'interface. Il n'existait que très peu de classes de "widget" dans AIRELLES, ce qui a contraint Xavier Dubourg à un très lourd travail de développement de bas niveau. De plus, l'abandon de LELISP par l'INRIA a

17. Développé à l'Université de Caen.

empêché toute expérimentation du logiciel dans les classes. Par la suite, l'équipe s'est orientée vers des plates-formes commerciales afin de pouvoir tester rapidement les prototypes avec des élèves en classe.

Les autres règles, relativement classiques pour la conception de systèmes interactifs, sont maintenant souvent appliquées également en EIAO. Elles s'appuient sur différentes techniques bien identifiées par les méthodologies de conception centrée-utilisateur mises au point dans le domaine de la communication homme/machine et de l'ingénierie des systèmes interactifs : utilisation de scénarios d'utilisation dans les méthodes de construction et d'évaluation, analyse de l'activité, modélisation des tâches. Elles nécessitent d'accorder attention à l'utilisabilité, aux différences individuelles, au contexte, aux différentes catégories d'utilisateur, à la sémiotique, etc. Notons cependant que ces techniques issues de l'ergonomie nécessitent pour le moins d'être adaptées pour être appliquées en EIAO. En particulier les méthodes d'évaluation des EIAO sont un thème de recherche actif qui ne peut se limiter ni aux techniques pour mesurer l'utilisabilité, ni aux expériences de comparaison entre groupe expérimental et groupe témoin. Un des points sur lesquels nous insistons est la prise en compte des critères d'évaluation dès le début de la conception des systèmes et la mise au point d'évaluation prenant en compte à la fois de méthodes issues de l'ergonomie des logiciels interactifs et de l'ingénierie didactique [Jean et al. 1997, Pavel 1999].

Le processus de conception qui vient d'être décrit a été mis en œuvre dans un certain nombre systèmes conçus au LIUM. Des processus de conception très proches sont maintenant adoptés dans d'autres équipes EIAO. Les travaux de notre équipe ont peut-être contribué à en montrer l'intérêt aux chercheurs du domaine en France. Dans le cadre de ce processus de conception pluridisciplinaire, un système de spécifications des situations d'apprentissage a été mis au point : les situations d'interaction.

5.1.2. *Un modèle de conception : les situations d'interaction*

À partir des travaux en didactique sur les situations didactiques [Brousseau 1986] et la démarche d'ingénierie didactique [Artigue 1988], l'idée de situation d'interaction s'est imposée comme guide méthodologique pour la conception pluridisciplinaire et l'évaluation des logiciels. Initialement mise au point par Elisabeth Delozanne lors de la conception d'ELISE [Delozanne 1994], cette notion de situation d'interaction, liée à la tâche et aux objectifs respectifs du système et de l'utilisateur, s'est révélée constituer un cadre assez général pour spécifier et évaluer, dans une équipe pluridisciplinaire une interaction homme/machine pertinente en EIAO. Elle permet également de donner des critères d'évaluation du système construit en comparant les observations sur le terrain avec l'analyse a priori. Le modèle a été approfondi et développé par Xavier Dubourg pour la conception de REPERES puis appliqué explicitement ou implicitement à la conception d'autres systèmes au sein du laboratoire [Dubourg et al. 1995]. Nous rappelons ici les

principaux descripteurs de cette modélisation et les illustrons par une présentation d'ELISE et de REPERES.

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 (figure 5).

Dans le cas d'ELISE, qui concerne le calcul des primitives, les étudiants de DEUG (public cible) ont des difficultés car ils se noient dans des calculs qu'ils ne savent pas contrôler (problème d'enseignement). Marc Rogalski [Rogalski 1988, 1990] a proposé un enseignement explicite de méthodes pour aider les étudiants à anticiper et à contrôler leur résolution (analyse didactique). Dans ce cadre, le logiciel ELISE a pour objectif de donner des leçons de méthodes en incitant les étudiants à anticiper, en leur permettant de faire des choix raisonnés, en leur indiquant des stratégies et des tactiques pour leur apprendre à regarder les propriétés des expressions qui les conduisent vers une solution.

Description des situations

Objectifs de la situation

Tâche

description aux apprenants (consigne, données)
description au maître (variables didactiques)

Action des élèves

sur le système informatique
en dehors du système informatique

Stratégie des élèves

stratégies de référence
stratégies prévisibles

Actions du système

nature (conseil, aide, changement de représentation)
effet attendu (renforcement, doute, questionnement)
mode de présentation (textuel, visuel, sonore)
protocole (fugitif, bloquant)

Stratégie du système

objectif (initiation, évaluation)
fréquence (suivi immédiat, différé ou à la demande)

Figure 5. Descripteurs d'une situation d'interaction extrait de [Dubourg 1996]

Trois situations d'interaction sont proposées :

- une résolution pas-à-pas pour inciter à faire des choix raisonnés et donner une correction détaillée de l'exercice,
- une résolution en donnant un plan de solution pour inciter les étudiants à anticiper en appliquant la méthode ou bien à synthétiser les grandes lignes de leur résolution,
- une vue générale des solutions qui permet de faire un bilan sur les solutions “raisonnables” i.e. suggérées par la méthode pour inciter les étudiants à comparer des solutions et à enrichir leur panoplie de démarches de résolution.

Ce travail de recherche sur les explications en EIAO (Cf. 2.5) a donné lieu à la réalisation d'un prototype pré-opérationnel qui a été utilisé en TD de DEUG pendant plusieurs années. Un logiciel destiné à être inséré dans un dispositif d'enseignement sur mesure est en cours de développement.

Dans le projet REPERES, le problème d'enseignement est celui de la difficulté des élèves de fin de collège à raisonner sur les droites du plan. Une étude cognitive et didactique de Duval [Duval 1988] fait apparaître que pour surmonter ces difficultés résistantes il est nécessaire de travailler explicitement les règles de correspondance sémiotiques entre le registre des représentations graphiques et le registre des écritures algébriques. Se fondant sur cette étude, le logiciel REPERES mis au point par Xavier Dubourg [Dubourg 1995] propose des activités aux élèves permettant de mettre en œuvre les concepts dans des contextes variés :

- activités graphiques et algébriques permettant de travailler sur le passage d'une représentation à l'autre,
- activités d'association et de détection d'intrus pour faire le lien entre les deux représentations,
- activités de résolution pour mettre en œuvre les règles de correspondance dans une activité plus complexe.

Xavier Dubourg a enrichi le modèle statique des situations d'interactions en proposant une architecture logicielle générique permettant une gestion de l'interaction sur la durée de la session et suivant plusieurs stratégies. Ainsi, contrairement à ELISE où les rétroactions du système sont stéréotypées, le logiciel REPERES cherche à adapter les activités et les interventions du système aux actions passées de l'élève sur le logiciel.

Dubourg [Dubourg 1995] distingue, du point de vue de l'interaction, l'environnement de travail, sur lequel l'élève agit, et un module pédagogique qui intervient sur cet environnement de travail. Dans Repères les objets manipulés par l'élève dans l'environnement de travail sont réifiés. Par exemple, une droite dessinée par un élève à l'écran est un objet informatique décrit par un nom, une représentation machine, une représentation graphique et une représentation algébrique. De même, toutes les actions de l'élève sur ces objets sont réifiées. L'environnement de travail est ainsi l'interface utilisateur et une modélisation de cette interface ; son rôle est donc double.

L'environnement de travail gère tout ce qui concerne "l'interaction de surface" (les changements de curseurs, la cohérence entre plusieurs représentations d'un même objet). Ce niveau concerne l'interaction de l'élève avec les connaissances du domaine dans le cadre des situations d'interaction.

L'environnement de travail est un "agent réactif" par rapport aux actions de l'élève. De plus, par le biais d'événements logiciel (qui modélisent le comportement de l'élève du point de vue de l'analyse didactique), il informe le module pédagogique des actions de l'élève afin que celui-ci puisse raisonner à un niveau plus global et assurer une cohérence à la session. Le module pédagogique est un "agent intentionnel" qui gère ce que Xavier Dubourg appelle l'interaction profonde.

Cette gestion de l'interaction dans le temps est indispensable dès que le système à concevoir est destiné à être utilisé plus d'une fois et sur une longue période. Elle s'appuie sur une modélisation pédagogique en termes de plans d'intervention et de méta-règles pour décider des stratégies d'intervention. La pertinence de l'expertise pédagogique est conditionnée par la pertinence de la modélisation du comportement de l'apprenant en terme d'événements logiciel.

5.2. Modélisation de l'apprenant et diagnostic de compétences

Le thème de la "modélisation de l'apprenant" est un thème majeur dans la littérature autour des tuteurs intelligents et a été abordé de manière significative dans différents projets (QUIZ, REPERES, ROBOTTEACH) qui se sont intéressés au recueil d'observables "à la volée", en cours de session, dans un environnement d'apprentissage pour informer le logiciel ou le maître et l'aider à prendre des décisions concernant l'interaction. La détermination a priori des pré-requis pour suivre une formation ou des préconceptions des élèves est une préoccupation inévitable quand on cherche à orienter au mieux les activités proposées à un élève singulier dans le cadre d'un enseignement traditionnel ou à distance. Le diagnostic de compétences est un sujet important en formation professionnelle et a été abordé

dans ce cadre par les projets DIADEME et MARPLE, ainsi qu'en formation initiale avec les projets PEPITE et GCSE qui s'intègrent dans un contexte scolaire.

L'évolution des problématiques en EIAO et la prise en compte du maître ont conduit à modifier la manière de conduire cette modélisation. Dès que les premiers prototypes ont été assez avancés pour être confrontés à des situations d'usage, on s'est vite rendu compte du fait que les connaissances expertes :

- 1) étaient différentes des connaissances à enseigner,
- 2) n'étaient pas toujours directement accessibles pour les apprenants et que leur apprentissage procédait rarement par simple adjonction d'informations ou de concepts à partir de leurs connaissances initiales.

L'idée que les connaissances de l'élève sont un sous-ensemble des connaissances de l'expert (modèle de l'expertise partielle ou "overlay model") est séduisante car facile à mettre en œuvre au niveau informatique. Dans des domaines de connaissances assez simples (l'apprentissage du code de la route par exemple) et pour des apprenants ayant déjà une bonne connaissance du domaine, c'est une approximation qui peut être acceptable. Mais cette modélisation est inopérante dans l'apprentissage de connaissances complexes pour lequel ce type d'approche ne permet ni de comprendre ni de prendre en compte les difficultés des apprenants. De multiples travaux ont montré que nombre de conceptions des élèves ont peu de rapport avec les connaissances des experts, qu'elles ont cependant des domaines de validité, qu'elles peuvent s'ériger en obstacles et qu'il est nécessaire d'imaginer des activités spécifiques pour déstabiliser des conceptions inadéquates ou erronées. Cela pose alors la question d'une détermination suffisamment fine et précise de ces conceptions.

5.2.1 Modélisation de l'apprenant

QUIZ (cf. 2.3) incluait une modélisation rudimentaire, qui s'appuyait sur la classification de Self [Self 1987] concernant les fonctions d'un modèle de l'élève dans un tuteur intelligent. Elle permettait de prendre des décisions assez élémentaires du type : si l'élève est un enfant, adopter un style familier d'intervention, si l'élève est un joueur de compétition, le placer dans le mode apprentissage libre, s'il est débutant le placer en mode apprentissage guidé, si l'élève demande souvent de l'aide diminuer le niveau de difficulté des exercices. Ces prises de décisions s'appuient pour certaines sur des connaissances de sens commun mais d'autres reposent sur une interprétation implicite des observables qui peut ne pas être pertinente dans une situation singulière. Par exemple, l'observable "l'élève demande souvent de l'aide" peut être interprété de nombreuses manières : il teste le système, il est dérouté par l'interface, il sait résoudre le problème mais d'une autre façon que celle imposée par le tuteur, l'exercice est trop difficile pour lui, il veut confronter ses idées aux attentes du logiciel, etc.

Dubourg et al. (1995), reprenant une analyse développée par Nicolas Balacheff [Balacheff 1994 p. 23], distinguent un modèle comportemental et un modèle épistémique. Le premier rend compte des comportements de l'élève en tant qu'organisation des observables, c'est-à-dire des événements que l'on a décidés de prendre en compte à l'interface. Le second est construit en attribuant une signification aux comportements. Nicolas Balacheff associe à cette modélisation une méthodologie de validation du modèle construit.

Xavier Dubourg propose, à partir d'une analyse didactique, de spécifier la nature des observables du comportement de l'apprenant que l'interface du système doit être en mesure de capter et propose des outils pour mettre en œuvre ces spécifications : les événements logiciels. La succession des événements logiciels déclenchés au cours d'une interaction constitue les observables sur lesquels se fonde le module pédagogique pour construire un modèle épistémique. Xavier Dubourg a proposé la notion de méta-événement pour représenter les stratégies des élèves : il s'agit d'avoir une vision locale sur le comportement de l'élève (les événements logiciel) et global sur la compétence de l'élève (les méta-événements). Mais en dehors d'un ou deux exemples spécifiques, les observables se révélaient insuffisants pour inférer ces stratégies repérées par l'analyse didactique. Cette notion n'a donc pas vraiment été mise en œuvre ce qui montre que fonder les observables sur une analyse didactique solide ne suffit pas à assurer un diagnostic pertinent en situation.

Ces deux exemples montrent toute la difficulté d'établir en temps réel un diagnostic pertinent sauf à interrompre l'activité de l'élève et le questionner ce qui pose bien évidemment d'autres problèmes.

5.2.2 *Diagnostic de compétences*

Les projets DIADEME, MARPLE, PEPITE et GCSE se sont consacrés au diagnostic de compétences, c'est-à-dire à positionner les connaissances et les compétences de l'élève par rapport à une grille de compétences attendues dans un domaine afin de mieux orienter son apprentissage. Les deux premiers projets se situent dans un contexte de formation professionnelle et les deux derniers s'intéressent aux mathématiques en fin de collège et aux langues étrangères.

Dans le cadre d'un projet de mise à distance d'un enseignement d'électronique développé par l'AFPA, Pierre Jacoboni a réalisé DIADEME, système de diagnostic destiné à aider l'apprenant à s'auto-évaluer. L'idée était de réutiliser l'énorme quantité d'expertise disponible dans les documents papiers élaborés par les formateurs, en l'occurrence les documents d'auto-évaluation de l'AFPA cumulant l'expérience de plusieurs générations d'enseignants. Malheureusement, les connaissances ainsi extraites se sont révélées en grande partie inappropriées. En effet, comme nous l'avons signalé au paragraphe précédent, l'expertise des formateurs est marquée par le caractère opérationnel de la tâche qui leur incombe

dans l'entreprise. Si elle est suffisante pour être efficace en enseignement présentiel quand le formateur peut mobiliser sa connaissance fine des situations pour prendre des décisions, elle ne l'est plus pour fonder un logiciel avec lequel l'apprenant travaille en autonomie. Le travail informatique très important fourni pour mettre en œuvre cette expertise s'est révélé inutilisable. Seuls les principes qui le sous-tendaient ont pu être repris.

Dans le cadre d'un contrat CIFRE avec les Mutuelles du Mans Assurances, Philippe Teutsch a développé MARPLE, un système d'évaluation et de suivi de formation en anglais [Teutsch et Vivet 1993], [Teutsch 1994]. À travers une démarche d'individualisation de la formation devenue incontournable pour l'apprentissage d'une langue de spécialité, les formateurs en langues cherchent à mettre l'apprenant en situation réelle de communication et à lui permettre d'analyser sa propre progression dans l'apprentissage. Les outils d'auto-évaluation et d'auto-orientation assistés sont dans ce cadre aussi importants que les ressources d'apprentissage proprement dites. Le système MARPLE offre un ensemble de situations de test permettant de valider les compétences en compréhension écrite et orale en anglais professionnel à travers des questions fermées ou ouvertes (par saisie de texte au clavier). Ce travail a été l'occasion d'une première étude sur le diagnostic de compétences et sur le suivi de l'apprenant en langues étrangères. Il a également permis de proposer un modèle général de description d'une situation d'évaluation dérivé des travaux de Élisabeth Delozanne et Xavier Dubourg [Teutsch 1996]. Il a enfin montré que la dimension communicative, non encore véritablement intégrée à l'époque dans les EIAO en langue, pouvait être un élément déterminant dans l'appropriation par les apprenants de leur situation d'apprentissage.

Les problématiques de recherche concernant les outils d'auto-orientation ont été reprises par le projet GCSE qui s'intéresse à la création d'un système interactif d'évaluation des connaissances à destination d'un public de jeunes anglophones apprenant le Français en tant que Langue Étrangère (FLE). Ce projet a bénéficié du travail conjoint d'étudiants de 3ème cycle en didactique des langues (mémoire de DESS FLE) et en Ingénierie Éducative (stage de DEA en informatique). Son but est de réaliser un environnement interactif motivant l'apprenant dans son apprentissage [Bourdet et Teutsch 1997]. Il s'agit en particulier de définir une méthodologie de conception permettant la modélisation des trois points suivants : connaissances nécessaires au comportement efficace du système, synthèse des analyses de productions écrites sous forme d'un profil d'apprenant, présentation de ces analyses à l'apprenant lui-même. Le principe de cette visualisation du profil est de recontextualiser l'apprentissage et d'offrir à l'apprenant un regard immédiat, et discret, sur son parcours (compétences validées, difficultés rencontrées et contexte d'apparition, remédiations proposées) [Bourdet et Teutsch 2000]. La génération du profil s'appuie sur les observables issues de la trace d'exploitation du système. Le système GCSE est en cours d'expérimentation auprès de plusieurs classes de collégiens en Angleterre.

Le projet PEPITE [Jean et al 1997] s'intéresse au diagnostic des compétences des élèves en algèbre à la fin du collège. Il se fonde sur une étude didactique et cognitive menée par Brigitte Grugeon [Grugeon 1995 et 1997]. Cette étude témoigne des efforts constants que les élèves prodiguent pour donner du sens aux activités même scolaires. Elle montre comment les élèves en fonction des activités qui leur sont proposées au collège ou en lycée professionnel, construisent des compétences parfois correctes par rapport à la compétence de référence, et parfois incomplètes ou inadaptées. Grugeon soutient qu'il faut identifier ces compétences (les "pépites") pour les faire évoluer ou pour les déstabiliser si elles sont inadaptées ou incorrectes et ainsi aider les élèves à construire des compétences plus adaptées (des "lingots"). Pour cela, elle a construit un outil (papier-crayon) de diagnostic qui repose sur un modèle multidimensionnel de la compétence algébrique à ce niveau d'étude. Ce modèle permet d'analyser à la fois les exercices proposés aux élèves et les réponses justes ou erronées que ceux-ci produisent. Cette dernière analyse permet à des enseignants formés de construire des profils cognitifs de leurs élèves en algèbre. Ces profils comportent une description qualitative de la compétence d'un élève exprimée en terme de taux de réussite mais aussi une description qualitative en terme de modes de fonctionnement (utilisation des lettres, type de justification, type de conversion entre registres, connaissances numériques) et d'articulation entre les différents registres (graphiques, algébriques, géométriques, langue naturelle).

Cependant la construction de ces profils est lourde et coûteuse en temps. Un travail utilisant uniquement le "papier crayon" peut difficilement sortir d'un cadre de recherche et devenir opérationnel. En se fondant sur ce travail didactique, la thèse de Stéphanie Jean [Jean 2000] a eu pour objectif de prouver qu'il est possible, sur ordinateur, d'une part de collecter des observables pour élaborer semi-automatiquement un profil cognitif des élèves de fin de collège en algèbre, et d'autre part de fournir un prototype utilisable par un large éventail d'enseignants.

Le logiciel réalisé par Stéphanie Jean [Jean 2000] atteint en grande partie ces deux objectifs. Il comporte trois modules : PépiTest propose des exercices aux élèves et recueille leurs réponses, PépiDiag analyse 80 % des réponses des élèves et les codes en référence au modèle de compétence, PépiProfil construit un profil de l'élève à partir d'une analyse transversale des résultats du codage des réponses sur l'ensemble des exercices. Ce dernier module permet à l'enseignant de visualiser le profil mais aussi de le compléter et de le modifier.

Un prototype pré-opérationnel a été testé auprès d'une centaine d'élèves dans des situations de classe et validé [Jean et al. 1997] en utilisant différents critères : ergonomiques fondés sur les travaux en IHM et didactiques fondés sur le modèle proposé par Nicolas Balacheff [Balacheff 1992]. Des tests d'utilisabilité ont par ailleurs été menés auprès d'une vingtaine d'enseignants et ce logiciel est utilisé en formation des maîtres par les membres de l'équipe de conception. Une étude sur son intégration dans les pratiques enseignantes est en cours.

Notons que contrairement au module de diagnostic des Tuteurs Intelligents, PEPITE est conçu comme un outil pour assister l'enseignant dans sa tâche de diagnostic et non pour imposer une activité aux élèves.

Le travail de Stéphanie Jean montre, qu'en s'appuyant sur une analyse didactique fine des compétences mises en jeu dans les tâches proposées, on peut déplacer vers l'interface une partie du problème de diagnostic pour l'élaboration d'un modèle de l'élève. On peut ainsi recueillir des observables qui facilitent l'interprétation et obtenir un profil assez fiable avec un module de diagnostic par certains côtés assez rudimentaire puisque le logiciel ne cherche pas à comprendre le sens des réponses en langage naturel mais y prend simplement des informations. Ce travail illustre l'intérêt de croiser des problématiques issues de la didactique et de l'IHM [Jean et al. 1999].

Il s'agit cependant d'un travail exploratoire. L'équipe envisage de varier les tâches de diagnostic pour permettre aux enseignants de faire passer le test à plusieurs moments dans l'année ce qui pose de nouveaux problèmes de nature didactique et informatique de modélisation des activités proposées aux élèves.

A la suite de Pépité, le projet Lingot, en cours d'élaboration, consiste à mettre en place des activités nouvelles sur ordinateur pour faire évoluer les profils. Un travail en cours a pour objet de favoriser, par la conception d'une situation de conflit socio-cognitif, l'utilisation par les élèves de plusieurs registres d'expression. L'objectif est d'instrumenter l'activité de l'enseignant dans la prévision d'activités d'apprentissage en algèbre en lui permettant de s'appuyer sur des profils d'élèves construits par Pépité et sur une base de données d'activités diversifiées indexées par les compétences.

Les problématiques de la modélisation de l'apprenant ont évolué d'une prise en compte par la machine des actions de l'apprenant vers la construction de profils fournis à l'enseignant [Labat et Baron 1998]. Cette évolution marque l'intérêt croissant des travaux de l'équipe pour l'assistance au maître et au formateur que nous allons détailler. Auparavant, nous allons revenir sur la question des modes de communication entre l'apprenant et la machine, notamment que peut offrir la recherche sur la modélisation du dialogue.

5.3. *Apprentissage machine et dialogue*

Martial Vivet a initié et dirigé une série de travaux ayant pour objectif de prendre en compte les dimensions linguistiques et dialogiques des apprentissages dans la conception des EIAO. L'étude des interactions tuteur-apprenant a tout d'abord permis de développer des systèmes où le langage n'intervient pas en tant que tel, mais où le dialogue prend toute sa dimension d'un point de vue pragmatique

(acte de langage, contexte d'énonciation, structure discursive). En intégrant au sein du LIUM des chercheurs en linguistique, Martial Vivet a favorisé l'émergence d'une équipe pluridisciplinaire "Langue et Dialogue" dont les axes de recherches (modélisation évolutive de la langue naturelle, analyse robuste d'énoncés, dialogue personne-machine) contribuent au domaine des sciences et techniques éducatives sans toutefois s'y réduire.

Nous avons déjà présenté les travaux intégrant les aspects dialogue (STUDIA, DISCO) ou liés à l'apprentissage spécifique des langues étrangères (MARPLE, GCSE, CROISIERES), attestant de l'importance de la dimension communicative dans les EIAO.

En marge de ces études dédiées à l'apprentissage humain, ont été menées des recherches sur la modélisation du dialogue et sur l'interprétation des énoncés agrammaticaux. À partir des travaux en linguistique de Daniel Luzzati [Luzzati 1995], Jérôme Lehuen a développé COALA, un modèle de dialogue dynamique et générique qui intègre l'acquisition, du point de vue de COALA, de sa propre compétence langagière [Lehuen et al. 1996], [Lehuen 1997]. Ce modèle, qui part de l'hypothèse que la langue effectivement utilisée est non-normée, propose une solution dialogique pour compenser les éventuelles lacunes ou écarts grammaticaux. Le modèle de dialogue repose sur le concept d'UMI (Unité Minimale d'Interaction) qui segmente le dialogue en unités ayant une signification interactionnelle. Les informations contenues dans une UMI permettent d'engager des phases de négociation, structurées de façon hiérarchique, qui permettent au système d'enrichir son lexique et ses structures syntaxiques.

Fort de ces premières recherches, Martial Vivet et Jérôme Lehuen (1998) ont formulé l'hypothèse qu'il est possible de faire progresser globalement les domaines des TALN (traitements automatiques des langues naturelles) et des EIAH en considérant comme central le double apprentissage machine et humain. Cela implique de considérer conjointement les deux apprentissages mis en jeu ; c'est en travaillant à la conception de logiciels permettant un co-apprentissage par l'homme et la machine que ces chercheurs envisagent d'engager des travaux de recherche susceptibles de fertiliser et de faire progresser à la fois les trois domaines : EIAH, TALN, et apprentissage-machine.

Une première série de travaux est engagée dans le projet SAMPRAS [Lehuen 00] dont l'objectif est d'exploiter le modèle de dialogue COALA dans le cadre d'un système devant développer les capacités communicatives d'apprenants étrangers dans un contexte culturel "authentique" (réalisation de recettes de cuisine française). La mise en commun de COALA et des travaux en EIAO des langues permet actuellement d'envisager des systèmes intelligents pouvant dialoguer "naturellement" en français avec des apprenants étrangers ne maîtrisant pas parfaitement le lexique et la grammaire.

Avec l'introduction du dialogue dans l'apprentissage des langues assisté par ordinateur, Jérôme Lehuen adopte une approche communicative qui considère que

l'apprentissage d'une langue étrangère repose moins sur l'acquisition de compétences formelles et grammaticales que sur l'acquisition de compétences référentielles et stratégiques nécessaire à la communication.

5.4. Assister les acteurs dans leur travail

Pascal Leroux relatait des phénomènes de “sursollicitations” du formateur dans le cadre de l'utilisation de micromondes en formation professionnelle (cf. 3.5). Pour pallier ces difficultés, les travaux se sont orientés vers la conception et la réalisation d'un assistant pédagogique logiciel partenaire des apprenants et du formateur au sein d'un environnement coopératif d'apprentissage. Le modèle d'environnement coopératif d'apprentissage imaginé est fondé sur l'articulation de deux espaces de coopération [Leroux 1995 p.66] :

- un espace de coopération locale où interagissent un groupe d'apprenants (deux à trois personnes), un assistant pédagogique informatisé et un micromonde matériel,
- un espace de coopération globale dans lequel un formateur interagit avec les espaces de coopération locale pour réguler l'avancement des activités et de l'apprentissage.

Le dispositif informatique est vu comme un assistant pédagogique tant pour un groupe d'apprenants dans la réalisation collective de ses activités que pour le formateur dans sa tâche de planification, d'animation et de suivi de session. L'application instanciant ce modèle, nommée Roboteach, est capable de gérer les activités prévues par le formateur et de coopérer avec les apprenants dans le cadre de la réalisation d'un projet donné de micro-robotique. L'organisation pédagogique est telle qu'un formateur conduit un ensemble de groupes d'apprenants répartis en ateliers. L'approche retenue vise à augmenter l'autonomie des apprenants au sein de chaque atelier en mettant à disposition des ressources multimédias et à permettre au formateur de gérer son temps par la planification des sessions et de prévoir ses interventions dans les activités des groupes.

En fait l'assistance au formateur est envisagée selon deux points de vue : d'une part, une assistance indirecte en supportant et assistant informatiquement les apprenants, et, d'autre part, une assistance directe par l'assistant pédagogique logiciel.

5.4.1. Assistance au travail des apprenants

Nous avons précédemment évoqué des difficultés rencontrées par les apprenants lors de la création de programmes de pilotage des micro-robots. Un des moyens imaginés pour les surmonter a été de transférer une partie de cette tâche au système notamment en lui faisant générer les procédures de pilotage. L'objectif a été donc de créer un environnement permettant une génération automatique de procédures de pilotage à partir d'une description graphique, explicitée par les apprenants, du micro-robot qu'ils ont monté. Cela permet, du point de vue apprenant, de déporter le problème de l'écriture de code vers un problème de description semi-abstraite du micro-robot (analyse en termes de composition de chaînes cinématiques) et à focaliser son attention sur les fonctionnalités du micro-robot.

Un système expert (moteur d'ordre zéro) permet de porter assistance au groupe d'apprenants lors de la description du micro-robot. Comme dans Repères, l'initiative est partagée entre le système et les apprenants. À la demande de ces derniers ou sur l'initiative du logiciel, des conseils sont apportés pour déterminer les pannes mécaniques ou électriques du micro-robot ou aider le groupe à retrouver les erreurs dans sa description. Dans le cas où le système ne sait plus répondre à leurs sollicitations, il fait appel au formateur pour débloquer la situation.

Une fois la description effectuée, le groupe dispose d'un environnement de programmation et de pilotage qui lui permet de créer ses propres programmes de pilotage en manipulant d'une part, les procédures générées par le système à l'issue de la description et, d'autre part, des structures algorithmiques d'itération et de répétition. L'exécution de ces programmes se traduit par des mouvements au niveau du micro-robot. Par ces mouvements, le micro-robot renvoie au groupe une image de sa programmation. Ces phases de rétroaction aident les apprenants à donner du sens aux programmes et à corriger par eux-mêmes leurs erreurs.

Dans cet environnement, les apprenants disposent des principales fonctionnalités des environnements de programmation ; c'est-à-dire l'édition, l'impression, la suppression et l'exécution de programmes. Toutes les manipulations se font par des clics souris. Aucune ligne de programme n'est à taper ; les contraintes syntaxiques des langages de programmation sont ainsi minimisées sans perdre de richesse dans la structure des programmes. Sans éliminer les difficultés conceptuelles liées à la programmation, un tel environnement permet de focaliser l'attention sur les notions fondamentales du domaine [Leroux 1996b] en sachant bien, par ailleurs, que les objectifs pédagogiques en programmation sont limités dans ce contexte. Il s'agit simplement de valider de petits programmes de débutants.

La mise en place de supports et d'assistances informatiques des activités a permis une diminution de la sollicitation du formateur due à des problèmes de manipulation de langage informatique et à la création des programmes élémentaires. Cela traduit bien l'intérêt de penser, en lien avec le travail pédagogique de l'enseignant, à des dispositifs de support et d'assistance aux apprenants. Néanmoins cela ne doit pas dispenser de mener une réflexion sur les possibilités d'assistance directe au formateur.

5.4.2. Assistance au formateur

Avec ROBOTEACH, le formateur dispose d'un environnement qui lui permet, d'une part, de préparer et de mettre en place des sessions, et, d'autre part, d'adapter les ressources mises à la disposition des apprenants au profil du public formé et aux objectifs pédagogiques visés.

La préparation d'une session consiste à planifier les activités (cours, exercices, description, programmation/pilotage) ainsi que les interventions du formateur au cours de la séance. Les rendez-vous fixés avec les apprenants, aux moments que le formateur juge opportuns, permettent de contrôler le bon déroulement de la session, d'apporter des consignes, d'effectuer une synthèse sur les savoirs et savoir-faire exploités, etc. La planification des activités s'accompagne d'un paramétrage des environnements de description et de programmation/pilotage pour les adapter aux objectifs pédagogiques qu'il s'est fixés et au public formé.

Des outils auteur permettent au formateur de créer ses propres livres de cours ou d'exercices (sous la forme de pages textuelles) et modifier tous les textes prédéfinis des livres de cours, d'exercices et d'aide du système. Cette adaptation des ressources de l'apprenant facilite l'appropriation de ROBOTEACH par le formateur en lui donnant les moyens d'adapter le système à des situations particulières d'enseignement.

Le projet ROBOTEACH accorde une place importante aux enseignants notamment dans la régulation des activités des apprenants. La question de renseigner l'enseignant sur les compétences, les activités et les problèmes rencontrés par les apprenants se pose de manière cruciale. Mais, si créer un module auteur et/ou offrir des paramétrages des logiciels élève sont des choses courantes, fournir à l'enseignant des outils d'analyse de l'activité des apprenants (ou à priori en cours d'activité, ou à posteriori) pose des problèmes délicats. Cela implique de définir des observables, d'analyser automatiquement des listes d'observables, souvent insuffisants ou trop nombreux mais peu significatifs, et de présenter les résultats de cette analyse à un enseignant pour qu'il puisse décider de son intervention, la plupart du temps sans modèle pour guider l'analyse ou les modes de présentation des résultats.

Ces questions ont été évoquées dans la section 4.2. Un travail mené par Ch.Després [Després et Leroux 1997] dans son stage de DEA illustre une approche intéressante. Elle consistait à greffer sur ROBOTEACH un système expert qui analyse les traces des sessions d'un groupe d'apprenants et alerte le formateur en cas de difficulté constatée dans l'interaction. Les observables, c'est-à-dire les événements significatifs par rapport à l'activité du groupe, sont appelés dans ROBOTEACH des tâches et l'ensemble des tâches possibles est représenté par un arbre de tâches. L'observation de difficultés d'utilisation rencontrées par des apprenants a permis de dégager certains *patterns* de difficultés (des parcours dans l'arbre des tâches) que le système est capable de détecter. À partir de cette détection, il fournit à l'enseignant des messages d'alertes. Ce premier travail exploratoire n'a

pas été expérimenté en situation réelle de formation mais il est actuellement réexaminé et approfondi dans le cadre des travaux de thèse de Christophe Després (cf. 4.5).

Le modèle de l'environnement coopératif d'apprentissage et le système ont été testés au cours de plusieurs expérimentations (plus de 400 h au total) avec des publics différents et hétérogènes (des stagiaires de CAP Industriel, des adultes d'une entreprise de sous-traitance industrielle en stage de reconversion et des élèves de collège) [Leroux 1995]. L'application a servi de support d'apprentissage aussi bien dans le cadre de formation de remobilisation d'adultes sur une semaine que pour des séances d'une heure et demie en collège en enseignement de la technologie. Comme nous l'avions déjà évoqué, les expérimentations ont notamment montré que l'usage de Roboteach dans l'environnement d'apprentissage en micro-robotique pédagogique avait fait évoluer les sollicitations du formateur. Elles sont devenues moins nombreuses (ce qui limite les cas de sursollicitation) et plus centrées sur les problèmes d'apprentissage. Le développement de ROBOTEACH s'est poursuivi après la thèse de Pascal Leroux jusqu'à sa commercialisation en mars 1998¹⁸.

Jusque dans les années 1997, le modèle d'environnement coopératif d'apprentissage et l'application ROBOTEACH ont été mis en œuvre dans des contextes de formation en classe. Avec la pression croissante vers l'enseignement à distance aussi bien du côté des entreprises que de l'éducation nationale¹⁹, il s'est avéré intéressant et même essentiel de réfléchir à la prise en compte de la distance dans les modèles et les dispositifs d'apprentissage. C'est pourquoi le thème des environnements interactifs d'apprentissage à distance s'est peu à peu affirmé et devient un des thèmes de recherche majeurs de l'équipe, posant d'une manière accrue la question de l'instrumentation du formateur.

5.5. Environnements d'apprentissage à distance

18. Cette application est maintenant diffusée en France (plus d'une centaine d'exemplaires vendus) dans les collèges pour l'enseignement de la technologie et dans les centres de formation continue pour l'alphabétisation à l'informatique et à la technologie.

19. Pour les PME/PMI, il s'agit de pouvoir réduire les coûts de déplacements des formateurs et pouvoir mettre en place des formations viables, c'est-à-dire avec un nombre suffisant de stagiaires ; regrouper plusieurs stagiaires d'entreprises différentes peut conduire à l'ouverture d'un stage ce qui serait impossible pour chacune d'entre elles prise séparément. En ce qui concerne l'Éducation Nationale, il s'agit de former les élèves aux nouvelles technologies éducatives et de développer les activités coopératives entre classes.

La plupart des situations présentées jusqu'ici supposent la présence des différents acteurs, apprenants et enseignants, présents en même temps et au même lieu. La coopération entre eux n'a souvent pas besoin du recours aux machines. La généralisation des réseaux, un intérêt accru vers des situations d'apprentissage à distance amènent à concevoir des environnements répartis sur les réseaux et à médiatiser la communication entre les différents acteurs. Il s'agit alors de concevoir des systèmes coopératifs d'apprentissage intégrant comme acteurs des formateurs et des apprenants, offrant de bonnes conditions d'interaction à travers les réseaux entre agents humains et agents artificiels de même que de bonnes conditions d'accès à des ressources formatives, réparties, humaines et/ou médiatisées.

GD.Visu@I [Pavel 1999] est un premier exemple développé au sein de l'équipe. Justifiée par le manque d'enseignants experts en géométrie descriptive, une architecture répartie, supportée par un système multi-agent, a été élaborée. Les apprenants et les formateurs (précepteurs) peuvent se connecter au dispositif d'apprentissage à partir d'un logiciel de navigation standard. La communication avec le serveur et entre eux est assurée par des agents virtuels. L'interface pour le précepteur, bien qu'elle n'ait pas complètement été implantée, inclut des outils synchrones et asynchrones. Le formateur dispose d'un tableau de bord, a accès à un historique du travail de l'apprenant et peut prendre la main sur la machine sur laquelle ce dernier est connecté durant une session.

Suite aux travaux menés autour de l'alphabétisation informatique et technologique, le modèle d'environnement coopératif d'apprentissage et l'assistant pédagogique logiciel instancié dans l'application ROBOTEACH, une nouvelle réflexion est en cours sur les possibilités d'étendre ces idées à un contexte de formation à distance. L'objectif est de concevoir et de réaliser un dispositif de téléapprentissage support à la mise en place d'activités à distance aussi bien individuelles que collaboratives. Pour cela, Pascal Leroux estime que l'environnement informatique doit (1) permettre aux apprenants d'utiliser un environnement de formation spécifique, (2) proposer un ensemble de fonctionnalités permettant l'échange structuré d'informations entre apprenants placés dans une situation de travail collaboratif en rapport avec leur activité d'apprentissage, et (3) proposer un ensemble de fonctionnalités d'assistance tant vers les apprenants que vers le formateur. Un des buts fixé est de ne pas limiter le contexte d'utilisation à la robotique pédagogique mais de proposer des architectures et dispositifs informatiques capables de s'adapter à d'autres domaines.

Actuellement deux thèses sont en cours sur ce projet. La première, effectuée par Christophe Després, pose le problème du suivi pédagogique en temps réel d'activités d'apprentissage à distance. Elle se place dans un contexte d'activités individuelles de plusieurs apprenants distants. L'idée est de réfléchir à l'instrumentation du formateur pour qu'il puisse percevoir l'activité des apprenants et intervenir dans le processus d'apprentissage. La perception s'appuie sur une analyse des productions des apprenants et des observables provenant de l'interaction de chaque apprenant avec le système. À partir d'un paramétrage par le formateur du module de suivi, le

système est capable d'alerter le formateur dans des situations d'interaction jugées critiques.

La seconde thèse, réalisée par S. George, pose le problème de la mise en place, de l'instrumentation et du soutien à des activités collectives entre apprenants distants. L'idée originale est d'utiliser la pédagogie de projet pour l'apprentissage collectif à distance en mettant en place, d'une part, une organisation autour d'un chef de projet (le formateur) et d'une équipe composée de plusieurs groupes d'apprenants distants, et, d'autre part, une structuration du projet fondée sur la notion d'étapes. Chaque étape est constituée d'une phase asynchrone pendant laquelle chaque groupe travaille seul et d'une phase de réunion en synchrone où l'équipe est réunie. À chaque phase est associée un document (document de groupe pour les phases asynchrones et documents d'équipe pour les phases synchrones) que le groupe ou l'équipe doit remplir. L'instrumentation de l'activité collective s'appuie sur l'intégration dans un même dispositif de fonctionnalités de communication et de travail collaboratif (messagerie électronique, forum et réunion de travail en synchrone fondés sur des actes de langage, partage et co-écriture de documents, calendrier). Le soutien de l'activité collective se limite à fournir au chef de projet des profils comportementaux des groupes. Ces profils sont utiles pour apporter une assistance personnalisée et avoir une idée du comportement des différents groupes dans l'équipe. Ils sont obtenus à partir de l'analyse des actes de langage des réunions en synchrone.

Le projet A3 s'intéresse également aux dispositifs de formation à distance. Lancé en 1999, il a pour objectif de définir des modèles permettant de décrire des situations de tutorat en ligne et de réaliser des Agents d'Assistance à l'Apprentissage (d'où le nom A3 prononcé Acube). Cette assistance à l'apprentissage intéresse l'apprenant lorsqu'il est confronté à une difficulté de manipulation ou à un blocage d'ordre cognitif ("Je ne comprends pas la consigne", par exemple), mais aussi à l'enseignant lorsqu'il doit intervenir pour répondre à une question posée par l'apprenant et intervenir sur la situation de blocage ("Où en était-il dans son activité ?", par exemple). La fonction d'assistance au tutorat nécessite dans ce cas de fournir au tuteur humain les informations utiles à son métier, à savoir guider l'apprenant dans son parcours d'apprentissage à travers des explications sur les activités proposées, sur les situations de blocages observées et sur l'analyse du trajet déjà effectué. La disponibilité de ces informations est particulièrement critique dans le cas de l'enseignement à distance. À un premier niveau, elles peuvent aider l'apprenant à continuer à travailler et à ne pas se démotiver. À un second niveau, elles permettent au tuteur d'avoir une connaissance précise de la situation d'apprentissage de l'apprenant et de pouvoir ainsi intervenir judicieusement.

L'aspect assistance au tuteur du projet A3 fait l'objet d'une thèse préparée par Omar Gueye dans le cadre d'un partenariat avec le CNED (Centre National d'Enseignement à Distance) ayant permis la réalisation et la mise en œuvre d'un dispositif de formation à distance pour débutants en Français Langue Étrangère (FLE) : CROISIERES [VIVET et al. 1999]. La richesse du dispositif développé (24

modules exploitant des documents multimédia et proposant des activités de découverte, de compréhension et de production) et la variété des itinéraires potentiels confirment la nécessité d'offrir aux deux utilisateurs (apprenant et tuteur) des fonctions d'assistance et d'aide au repérage dans le parcours d'apprentissage.

Le souhait d'arriver à une coopération entre le dispositif informatique d'apprentissage et le formateur est encore plus prégnant dans un contexte de formation à distance. En effet, la distance annule toute possibilité pour le formateur de vivre "physiquement" et en temps réel les séances d'apprentissage. C'est souvent sur ce vécu qu'il se forge une opinion sur les apprenants et sur la situation d'apprentissage. De cette opinion dépend en grande partie le degré de ces interventions auprès des élèves (très interventionnistes ou pas), de la planification dynamique des activités dans le cas de formation longue, des activités de remédiations à mettre en place, etc. La solution en cours d'exploration dans les recherches exposées ci-dessus est de spécifier et développer des systèmes informatiques capables de rendre compte des activités des apprenants. En poussant plus loin la démarche, l'idée serait d'aboutir à des systèmes de plus en plus coopératifs avec le formateur capables de capitaliser l'expérience acquise au fil des interactions et des situations d'apprentissage. Du point de vue informatique, cela implique d'intégrer des capacités d'apprentissage. Ce thème de l'apprentissage machine n'est pas étranger aux travaux de l'équipe puisque un groupe de chercheurs en linguistique s'y intéresse en particulier dans le cadre de la modélisation du dialogue.

6. Discussion et conclusion

A l'issue de ce tour d'horizon, on peut constater la diversité des travaux menés au sein de l'équipe EIAO du LIUM et impulsés par Martial Vivet. Les recherches ont été guidées par la volonté d'allier modélisation et expérimentation dans un souci de concevoir des applications ou des dispositifs intégrés dans des contextes d'usage effectif. Une première perspective, issue des applications de l'Intelligence Artificielle a visé à permettre à une machine de gérer une session d'apprentissage, à partir de la représentation explicite de divers types de connaissance : du domaine, de l'élève, du tutorat. Une seconde, venant de Logo et des micromondes, a attribué un rôle majeur à l'activité de l'apprenant dans l'apprentissage. Cette double perspective a abouti à une forme de synthèse dans la conception de systèmes où la situation d'apprentissage est envisagée dans sa complexité du point de vue de la connaissance en jeu et du point de vue du rôle et de l'activité des différents acteurs dans un contexte donné.

L'équipe EIAO du LIUM a parfois anticipé ou suscité l'évolution du domaine des EIAO. On peut citer notamment les préoccupations vis-à-vis du rôle attribué au

maître dans les environnements, le domaine de la robotique pédagogique en formation professionnelle, l'importance à attribuer à l'interface et au dispositif technique dans la construction des connaissances, le diagnostic des compétences des apprenants, la mise au point de systèmes collaboratifs, la prise en compte de situations de téléapprentissage.

Une formule, un peu directe, peut résumer le cheminement des recherches dans l'équipe : aller de l'intelligence de la machine vers l'interaction avec la machine et les différents acteurs. Ce cheminement correspond à une évolution du domaine : très axé dans les années 80 sur les connaissances de résolution de problèmes, les chercheurs ont ensuite étendu leurs investigations à l'activité humaine dans ces aspects contextuels et situés mais aussi dans ses aspects sociaux et culturels. Il ne s'agit plus seulement pour les chercheurs de modéliser des connaissances de référence à apprendre, mais de considérer l'interaction avec un environnement et avec d'autres acteurs qui peuvent être distants. Il correspond à trois interrogations que nous allons discuter : la forme de représentation des connaissances, la généralité des environnements conçus et l'instrumentation du travail des acteurs apprenants et enseignants.

6.1. *Quelle forme de représentation des connaissances ?*

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'Intelligence Artificielle, dans les années quatre-vingts, a orienté les chercheurs en EIAO vers la représentation des connaissances, de préférence sous une forme explicite et déclarative (i.e. non liée à l'utilisation). L'objectif des recherches était de "réifier" les connaissances pour pouvoir construire des programmes qui raisonnent sur ces connaissances. On pensait qu'il fallait ainsi représenter non seulement les connaissances du domaine mais également les connaissances pédagogiques et didactiques. Le projet Amalia préconisait pour cela le formalisme des plans.

On s'est peu à peu aperçu que de telles exigences étaient très difficiles à satisfaire et que seule une partie infime des connaissances était ainsi accessible. Le recours à un formalisme unique pour représenter divers types de connaissances n'a pu être mis en œuvre. En outre, dans de nombreux domaines, fonder une interaction significative pour des apprenants sur des solveurs de problèmes issus de l'IA est un problème qui, à l'heure actuelle, demeure très ouvert.

Sans abandonner cette première piste de recherche, l'importance déterminante de l'activité de l'apprenant s'est confirmée et a conduit à une voie de recherche différente, centrée sur l'interface et l'interaction Homme-Machine.

Ainsi, dans la plupart des systèmes développés dans l'équipe EIAO du LIUM, les connaissances du domaine et les connaissances didactiques ne sont pas explicitement représentées en machine, mais, après analyse et modélisation, sont

intégrées dans l'interface et dans le code informatique. La machine ne dispose pas de représentation explicite du savoir ou des connaissances au sens de l'IA, mais les concepteurs opèrent une forme "d'encapsulation des savoirs" dans les environnements construits [Vivet 2000b, dans ce numéro]. L'idée sous-jacente est que l'interaction est primordiale pour l'apprentissage. Il s'agit alors "d'embarquer" l'analyse didactique dans l'interface pour que les connaissances souhaitées puissent être construites par les apprenants. Remarquons que les analyses didactiques, quand elles sont disponibles, sont loin d'être exprimées sous forme de modèle "à niveau connaissance" [Newell 1982]. La question de savoir si une telle expression est possible est par ailleurs une question très controversée.

Il ne s'agit pas de rejeter l'intérêt d'une modélisation informatique déclarative de la connaissance à enseigner ou de la connaissance didactique. Toutefois, on peut estimer qu'une telle modélisation, à court et moyen terme, risque d'être très partielle et le plus souvent insuffisante (sauf dans des cas très simples) pour aboutir à des prototypes pré-opérationnels utilisables en situation réelle d'apprentissage. Du point de vue d'une problématique d'usage, le fonctionnement même du système, tel qu'il apparaît à l'interface, est certainement primordial. Néanmoins, certains travaux de notre équipe sur la conception de systèmes coopérant avec le maître ou le formateur nécessitent une part de raisonnement de la machine sur la situation pédagogique et reviennent à des préoccupations de représentations explicites des connaissances.

De plus un intérêt actuel loin d'être négligeable de l'effort d'explicitation et de modélisation des connaissances concerne la formation des maîtres : le travail avec des enseignants sur ces modélisations favorise une réflexion en profondeur sur les différents types de connaissances et sur leur apprentissage.

Une question liée à cette discussion des modèles de connaissances encapsulées dans les systèmes ou exprimées sous forme déclarative est celle de leur généralité et de leur domaine de validité.

6.2. *Généricité versus généralisation située et domaine de validité des modèles*

Les modèles de conception d'environnements destinés à l'éducation sont de plusieurs types : des modèles strictement informatiques, des modèles issus de la psychologie, de la didactique ou des sciences de l'éducation. Les déceptions vis-à-vis des approches tuteurs intelligents ont conduit à un certain scepticisme à l'encontre de modèles généraux séduisants mais impossibles à mettre en œuvre et focalisant sur des aspects peut-être secondaires de l'apprentissage.

Ainsi, le travail mené dans l'équipe EIAO du LIUM, dès le début des années quatre-vingt-dix, a privilégié des approches fondées sur des conceptions de l'apprentissage constructivistes et situées. Il a conduit, d'une part, à affiner,

opérationnaliser, systématiser ou étendre des modèles didactiques existants, d'autre part, par l'introduction de nouveaux dispositifs, à fournir à la recherche en éducation de nouvelles situations à analyser et également de nouveaux moyens pour recueillir des données. Du point de vue de l'informatique, cela a conduit à proposer des modèles assez précis pour permettre une ou plusieurs réalisations informatiques et des dispositifs d'apprentissage incluant ces réalisations pour les valider.

Un des écueils de cette approche fondée sur la conception de systèmes dédiés peut être celui de l'absence de généralité des solutions retenues. La problématique d'usage que nous avons adoptée nous conduit à prioritairement adapter la conception aux particularités des situations, à leur singularité. Il s'agit d'élaborer des modèles qui généralisent nos expériences en précisant le domaine de validité de ces généralisations plutôt que de construire des modèles génériques. Cette approche d'une certaine manière plus inductive que déductive, fournit des solutions testables, des éléments réutilisables, permet de mieux comprendre les problèmes posés (ou de mieux poser les problèmes). Elle permet également de construire des solutions de plus en plus générales. Pour paraphraser [Carraher et Schliemann 2000] qui proposent le concept de "généralisation située", les modèles génériques ne sont pas puissants par leur détachement des instances particulières, mais au contraire dans leur utilité à expliquer une catégorie plus ou moins large de phénomènes particuliers.

6.3. Instrumenter l'activité des acteurs : apprenants et enseignants

Une des critiques adressées aux tuteurs intelligents concerne l'absence de prise en compte du côté contextuel ou situé de l'apprentissage et de son caractère de fait social. Les EIAO se sont intéressés à l'interaction et à la dimension contextuelle de l'apprentissage. Donner un rôle au maître, favoriser la coopération entre les apprenants conduit à mettre en place des outils de communication, autant entre l'homme et la machine que pour les humains entre eux. Les modes de communication sont alors différents.

Dans la communication homme/machine des années 70-80 telle que l'ont mise en œuvre les Tuteurs Intelligents mais aussi les EIAO, la machine est vue comme un partenaire de l'utilisateur : ce dernier pilote la machine par manipulation directe ou en utilisant un langage de commande par exemple ; la communication s'appuie sur un dialogue performant (langage naturel, dialogue contraint structuré, etc.). Actuellement, les agents humains ou artificiels collaborent et interagissent via un réseau de manière synchrone et asynchrone et, dans les interfaces multimodales manipulation et dialogue sont intégrés [Caelen et al. 1996]. Dans le domaine de l'éducation, il s'agit de gérer des communications entre apprenants ou entre apprenants et précepteurs ou entre un apprenant et un logiciel ou entre des

apprenants et un ou des logiciels. Le changement du sigle EIAO en EIAH prend en compte cette évolution. Il s'agit de concevoir des environnements complexes intégrant des machines assumant plusieurs rôles avec des acteurs humains différents, loin d'une interaction entre un élève isolé et une machine. L'apprentissage à distance bouleverse les architectures classiques des environnements d'apprentissage et soulève de nouvelles problématiques liées au co-apprentissage et à l'assistance à des humains distants. L'instrumentation de l'activité des apprenants mais aussi des enseignants est au cœur de ces problématiques qui touchent aussi bien à des problèmes de mise en place de situations d'apprentissage collectives, d'interface homme machine, d'assistance que de flux d'information entre les protagonistes.

Si la machine n'est pas entièrement apte à gérer des situations d'apprentissage, comment aider l'enseignant à le faire, d'autant plus que l'intrusion des machines change le contexte de son travail et lui enlève les repères qu'il pourrait avoir. De façon parallèle, l'introduction de dispositifs informatiques modifie le savoir et le rapport des élèves au savoir ce qui peut complexifier le travail pour les apprenants. Ces deux derniers phénomènes sont particulièrement sensibles en enseignement à distance.

Cela pose le problème de la co-adaptation nécessaire entre la conception des systèmes, les usages et les utilisateurs : l'objectif est de créer des environnements informatiques qui instrumentent le travail et les activités des apprenants et des enseignants alors que ces mêmes environnements ont une influence sur leur activité. Ce thème de recherche, très lié à des problématiques de sciences sociales et à la formation des enseignants, est au cœur des préoccupations actuelles de notre équipe.

6.4. *En guise de conclusion*

Dans cette histoire revisitée, nous avons voulu présenter une vision dynamique, construite sur la durée, de nos recherches en adéquation avec une vision à moyen et long terme de la recherche et de son application.

Depuis Logo utilisé dans le cadre scolaire et de la formation professionnelle, depuis l'EAO, les Tuteurs Intelligents, l'EIAO, jusqu'aux EIAH, aux environnements de télé-formation ouverts et répartis, aux TICE et à la déferlante Internet, Martial Vivet a toujours refusé de se laisser enfermer dans un unique cadre théorique, une unique problématique, un unique paradigme de recherche fût-il dominant. Au LIUM, il a créé une équipe autour de lui selon un principe de fonctionnement que l'on peut comparer au modèle de formation par compagnonnage qui lui était cher. Sous sa direction nous avons fonctionné comme un réseau de chercheurs travaillant sur des problématiques de recherches connexes ou communes

mais en recherchant des angles d'attaques différents auprès de chercheurs compagnons d'autres disciplines, d'autres laboratoires, d'autres domaines d'application. Ceci a amené notre équipe à faire non pas le Tour de France, mais le tour de la plupart des problématiques du domaine des EIAH dans un souci permanent d'explorer le maximum de pistes de recherche afin d'en tirer tout le potentiel et aussi d'en comprendre les limites. Ces limites ont été alors examinées non pas comme des échecs mais comme une obligation à trouver d'autres voies, d'autres solutions. Cette richesse et cette complémentarité des travaux nous ont permis, d'une part, d'avoir une vision large de l'évolution du domaine à court et moyen terme et, d'autre part, d'être assez souvent précurseurs : sur les environnements ouverts en formation professionnelle, sur l'importance accordée aux interfaces homme-machine, sur le rôle du maître dans la formation et la téléformation, par exemple. Enfin pour terminer avec la métaphore des Compagnons du Devoir, Martial a soudé l'équipe par la reconnaissance de valeurs fortes : une éthique de la recherche et de la conception de systèmes [Aiken 2000], un souci pour les usages sociaux des technologies et pour la dissémination des résultats de la recherche, un souci d'apprendre auprès de ceux qui pourraient être les exclus de la technologie si l'on n'y prend pas garde (alphabétisation informatique et technologique, bas niveau de qualification, pays du Sud), un souci de la dissémination des résultats de la recherche du côté des IUFM, de la formation professionnelle et de l'industrie.

À notre sens, la complexité du chantier de l'EIAH a exigé et exige toujours de ne pas considérer l'éducation comme un simple domaine d'application pour l'informatique mais à s'appuyer sur une dialectique entre la recherche en informatique et la recherche en éducation. Cependant et même si nos travaux se déroulent souvent dans un cadre pluridisciplinaire, ils se situent résolument en informatique. La difficulté est alors double : il ne faut se couper des recherches en informatique sous peine de concevoir des architectures, modèles et logiciels trop spécifiques et relevant plus d'un travail d'ingénieur que d'un travail de chercheur, ni du domaine de l'éducation sous peine de sombrer dans la réalisation d'applications qui ne dépassent pas les murs des laboratoires. Le défi est osé et la reconnaissance du travail effectué n'est pas toujours au rendez-vous. Mais c'est ce double ancrage qui a fait la renommée de l'équipe tant dans le monde de la formation professionnelle et de l'éducation que dans la communauté scientifique au niveau national et international.

Au-delà de la personnalité charismatique de son fondateur, le cheminement des recherches de l'équipe de Martial Vivet montre le caractère fertile des approches plurielles qu'il a mises en place et développées : approches informatiques croisant des problématiques de l'Interaction Homme-Machine et de l'Intelligence Artificielle, en particulier de l'Ingénierie des connaissances, approches issues des sciences humaines croisant des problématiques linguistiques, didactiques et pédagogiques.

Références

- [AIKEN 2000] AIKEN B., *Lignes directrices pour une utilisation des systèmes d'Intelligence Artificielle en éducation : préliminaires pour un débat*, dans ce numéro.
- [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 1992] BALACHEFF N., Exigences épistémologiques des recherches en EIAO, Génie éducatif, n°4-5, p. 4-14, septembre - décembre 1992.
- [BALACHEFF 1994] BALACHEFF N., *Didactique et intelligence artificielle*, in N. BALACHEFF et M. VIVET (EDS), *Didactique et intelligence artificielle*, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble, 1994, p. 7-42.
- [BALACHEFF et al. 1997] BALACHEFF N., BARON M., DESMOULINS C., GRANDBASTIEN M., VIVET M., *Conception d'environnements interactifs d'apprentissage avec ordinateur, tendances et perspectives*, In : Actes des 6^{èmes} journées nationales du PRC-GDR Intelligence Artificielle 1997, Hermès, p. 315-337, 1997.
- [BALACHEFF ET VIVET, 1994] BALACHEFF N., VIVET M., *Didactique et Intelligence Artificielle*, La pensée sauvage éditions, Grenoble, 1994, 302 p.
- [BARON et al. 1991] Baron M., Gras R., Nicaud J.-F., *Introduction*, in : Baron M., Gras R., Nicaud J.-F. eds., *Deuxièmes Journées EIAO de Cachan*, Les Editions de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Cachan, 24-25 janvier, 1991, p. 7-8.
- [BAUDRY ET SCHOES 1989] BAUDRY M., SCHOES Y., *SPF : un environnement d'apprentissage des concepts liés à la flexibilité dans la production*, Actes du 1^{er} congrès de Robotique Pédagogique, Le Mans, 24-28 août 1989, Éditions Université du Maine, p. 155-166.
- [BOURDET ET TEUTSCH 1997] BOURDET J.-F., TEUTSCH PH., *Projet Gcse, Évaluation des connaissances en Français Langue Étrangère*, Actes des X^{èmes} Rencontres de l'ASDIFLE Multimédia et FLE, Réseaux et Dispositifs, CNED Futuroscope Poitiers, 184-192.
- [BOURDET et TEUTSCH 2000], BOURDET J.-F., TEUTSCH Ph., *Définition d'un profil d'apprenant en situation d'auto-évaluation*, revue ALSIC n°5 (Vol 3, n°1), juin 2000, p. 125-136.
- [BOURI et al. 1990] BOURI M., DIENG R., KASSEL G., SAFAR B., *Systèmes à base de connaissances et explications*, Actes des 3^{èmes} journées nationales du PRC IA, Hermes, PARIS 1990, p. 328-339.

- [BROUSSEAU 1986] BROUSSEAU G., *Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques*, Recherches en Didactique des Mathématiques, Vol 7, n°2, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble, 1986, p 33-115.
- [BROUSSEAU 1987] BROUSSEAU G., *Les différents rôles du maître*, Actes du XIVème Congrès P.E.N., Angers, France, mai 1987, Éditions IREM de Nantes, p. 37-67.
- [BROWN et al. 1989] BROWN J.S., COLLINS A., DUGUID P., *Situated Cognition and the Culture of Learning*, *Educational Researcher*, 18 (1), 1989, p. 32-41.
- [BRUILLARD 1991] BRUILLARD É., *Caméléon, un résolveur incluant des fonctions perceptives évoluées*, Actes des Journées EIAO, PRC-IA, Editions de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 1991, p.121-140.
- [BRUILLARD 1997] BRUILLARD É., *Les machines à enseigner*, Hermès, 1997, 320 p., 200 F, ISBN 2-86601-610-6.
- [BRUILLARD 1998] BRUILLARD É., *Conception et usages des instruments informatiques pour l'apprentissage et l'enseignement*, Habilitation à diriger des recherches, Université du Maine, 1998
- [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.
- [CAELEN et al. 1996] CAELEN J. (eds, ouvrage collectif) *Nouvelles Interfaces Homme-Machine*, Observatoire Français des Techniques Avancées, Diffusion Lavoisier, Paris Décembre 1996, ISBN 2-906028-04-5.
- [CAELEN 1998] CAELEN J., *Communication Homme-Machine et sciences pour l'ingénieur*, *Revue d'Interaction Homme Machine*, volume 1- N°1/1998, p. 1-10.
- [CARRAHER ET SCHLIEMANN 2000] CARRAHER D. W., SCHLIEMANN A. D., *Lessons From Everyday Reasoning in Mathematics Education : Realism versus Meaningfulness*, in David H. Jonassen & Susan M. Land (Eds), *Theoretical Foundations of Learning Environments* (p 173-195), Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 2000.
- [CARRIERE et al. 1990] CARRIERE E., DELOZANNE E., VIVET M., *Des connaissances pour produire des explications dans un Tuteur Intelligent*, *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol 4, n°2/1990, edition Hermès, p.113-124.
- [CHEVALLIER 1992a] CHEVALLIER R., *Studia : mise en œuvre d'un modèle dynamique de dialogue dans un Tuteur Intelligent*, Thèse de l'Université du Maine, Janvier, 1992.
- [CHEVALLIER 1992b] CHEVALLIER R., *Un système tutoriel intelligent coopératif fondé sur la négociation et sur un modèle dynamique de dialogue*, Actes de ITS'92, Montréal, 58-65.

- [CHEVALLIER 1994] CHEVALLIER R., *Gestion de dialogues en EIAO : le système tutoriel Studia*, Sciences et Techniques Educatives, Vol 1 n° 3/1994, p.373-396.
- [DELANNOY 1994] DELANNOY P., *Peut-on enseigner un langage que personne ne parle ?*, Actes du colloque "Ordinateur en tête" de l'AQUOPS-AFDI, Québec, Canada, 6-10 avril, 1994.
- [DELANNOY 1996] DELANNOY P., *Symboles écrits et symboles graphiques : plus qu'une querelle d'école ? Un exemple issu de la robotique pédagogique*, Actes de la Cinquième Rencontre Francophone sur la Didactique de l'Informatique, EPI/INRP éditions, Monastir, Tunisie, 10-12 avril, 1996.
- [DELOZANNE 1992] DELOZANNE E., *Explications en EIAO : études à partir d'ELISE, un logiciel pour entraîner à une méthode de calcul de primitives*, Thèse de l'Université du Maine, Janvier 1992.
- [DELOZANNE 1994] 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 VIVET 1990] DELOZANNE E., VIVET M., *Tuteurs Intelligents et Formation*, Actualité de la Formation Permanente N°107, Juillet-Août 1990, p. 55-61.
- [DERYCKE 1997], DERYCKE A., *La mise en pratique dans la conception des IHM : l'intrusion de l'Utilisateur, la place du chercheur en sciences sociales, l'observation*, Cours à l'école d'été Interaction Homme Machine organisée par le CNRS et l'AFIHM, Marseille Luminy, 7-18 Juillet 1997.
- [DESPRES ET LEROUX, 1997] DESPRES C, LEROUX P., *Raisonner sur la trace : Analyse de sessions avec l'application Roboteach*, In M. Baron, P. Mendelsohn, J.-F. Nicaud (Eds) Actes des 5^{èmes} journées EIAO de Cachan, Hermès, p. 277-288, 1997.
- [DUBOURG 1995] DUBOURG X., *Modélisation de l'interaction en EIAO, une approche événementielle pour la réalisation du système REPERES*, Thèse de l'Université de Caen, 242 p., Caen, Octobre 1995.
- [DUBOURG 1996] DUBOURG X., *Outils de conception en EIAO, un exemple de mise en œuvre : la conception de Repères*, Revue Sciences et Techniques Educatives, vol 3 n°4/1996, p. 443-464.
- [DUBOURG ET AL. 1995] 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.

- [DUVAL 1988] DUVAL R., *Graphiques et équations : l'articulation de deux registres*, Annales de didactique et sciences Cognitives, Vol.I, p. 235-253, IREM de Strasbourg, 1988.
- [FUTTERSACK 1990] FUTTERSACK M., *Quiz : une architecture multi-agents pour un tuteur intelligent*, Thèse de l'Université Paris VI, 1990.
- [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, p.167-210, 1997.
- [JACOBONI 1993] JACOBONI P., *Diadème, un système d'EIAO pour faire de l'Evaluation Interactive Avec Ordinateur*, thèse de l'Université Paris VI, Janvier 1993.
- [JEAN 2000] JEAN S., *Pépîte, un système d'assistance au diagnostic de compétences*, Thèse de l'Université du Maine, Le Mans, Janvier 2000.
- [JEAN et al. 1997] JEAN S., DELOZANNE E., JACOBONI P., GRUGEON B., *Conception, réalisation et évaluation d'interfaces en EIAO : l'exemple de Pépîte*, in *Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur*, coordonné par M. Baron, P. Mendelsohn, J.-F. Nicaud, Actes des Cinquièmes Journées EIAO de Cachan, Hermès, p. 37-48, 1997.
- [JEAN et al. 1999] JEAN S., DELOZANNE E., JACOBONI P., GRUGEON B., *A Diagnosis Based on a Qualitative Model of Competence in Elementary Algebra*, In S. Lajoie, M. Vivet (eds), *Proceedings of Artificial Intelligence in Education*, Le Mans Juillet 1999, IOS Press, Amsterdam, 1999, p. 491- 498.
- [JONASSEN 2000] JONASSEN D.H., *Revisiting Activity Theory as a Framework for Designing Student-Centred Learning*, in *Theoretical Foundations of Learning Environments* Edited by David H. Jonassen, Susan M. Lund, p 89-121, Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 2000, ISBN 0-8058-3215-7.
- [KASSEL et al. 1986] KASSEL G., PARCHEMAL Y., PITRAT J., SAFAR B., *Pourquoi utiliser des métaconnaissances?*, PRC-IA, GRECO-CNRS, Journées Nationales d'Aix-les-Bains, Cepadues éditions, 1986, p 79-88.
- [LABAT ET BARON, 1998] LABAT J. M., BARON M., (Eds), *numéro spécial modélisation de l'apprenant*, Revue Sciences et techniques éducatives, Vol. 5, n°2, Hermès, 1998.
- [LABAT ET FUTTERSACK 1990] LABAT J.-M., FUTTERSACK M., *Quiz : un système pour enseigner le bridge*, Actes des journées EIAO de Cachan, ENS,1990.
- [LABAT 1990] LABAT J.-M., *Quiz : une contribution à l'amélioration des capacités pédagogiques des tuteurs intelligents*, Thèse de l'Université Paris VI, 1990.

- [LAGRANGE ET LENNE 2000] LAGRANGE J. D. ET LENNE D. (eds) actes des Journées Environnements Informatiques de calcul symbolique et apprentissage des mathématiques, Rennes, 15-16 Juin 2000.
- [LAURIERE 1986] LAURIERE J.L., *Intelligence Artificielle. Résolution de problèmes par l'Homme et la Machine*, Éditions Eyrolles, Paris, 1986.
- [LAVE ET WENGER 1991] LAVE J., WENGER E., *Situated Learning : Legitimate Peripheral Participation*, New-York : Cambridge University Press, 1991.
- [LEHUEN 1997] LEHUEN J., *Coala : Un modèle de dialogue dynamique et générique intégrant l'acquisition de sa compétence linguistique*, Thèse de l'Université de Caen, 1997.
- [LEHUEN 2000] LEHUEN J., *A Dialogue-Based Architecture for Computer Aided Language Learning*, Proceeding of the AAAI Fall Symposium on Building Dialogue Systems for Tutorial Applications, 3-5 nov. 2000, Cape-Cod (Mass.), p.20-27.
- [LEHUEN ET AL. 1996] LEHUEN J., NICOLLE A., LUZZATI D., *Un modèle hypothético-expérimental dynamique pour la gestion des dialogues homme-machine*, Actes de RFIA'96, Rennes, 180-189.
- [LENNE 1995] LENNE D., *Le dialogue en EIAO ; Étude à partir de Disco, un système de conseil en statistiques*, Thèse de l'Université du Maine, 1995.
- [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.
- [LEROUX 1993] LEROUX P., *Roboteach – Un générateur de sessions pédagogiques*, Actes du 4^e colloque international sur la robotique pédagogique, Liège, Belgique, 5-8 juillet 1993, Éditions Université de Liège – INRP, p. 135-145.
- [LEROUX 1996] LEROUX P., *Intégration du pilotage de micro-robots pédagogiques à un environnement de programmation*, Actes de la 5^e rencontre Francophone sur la Didactique de l'Informatique, Monastir, Tunisie, 10-12 avril 1996, Éditions République Tunisienne, p. 183-194.
- [LINARD 1996] LINARD M., *Des machines et des hommes ; apprendre avec les technologies nouvelles*, Paris, L'Harmattan, 290 p, 1996, 160 FF.
- [LUZZATI 1995] LUZZATI D., *Le dialogue verbal homme-machine*, Masson, Paris.
- [MACKAY et al., 1998] MACKAY W., FAYARD A-L., FROBERT L., MÉDINI L., *Reinventing the Familiar : Exploring an Augmented Reality Design Space for Air Traffic Control*, Actes de la conférence ACM CHI '98 Human Factors in Computing Systems, Los Angeles, USA, 1998.

- [NARDI 1997] NARDI Bonnie A. (Ed), *Context and Consciousness : Activity Theory and Human Computer Interaction*, Massachusetts Institute of Technology, 1996, réédité en 1997, 400 p, ISBN 0-262-14058-6.
- [NEWEL 1982] Newell A., *The knowledge level*, Artificial Intelligence, 18, p. 87-127.
- [NICAUD ET VIVET 1988] NICAUD J.-F., VIVET M., *Les tuteurs Intelligents, réalisations et tendances de recherche*, TSI, vol 7, n° 1, 1988.
- [NOSS ET HOYLES 1996] NOSS R., HOYLES C., *Windows on Mathematical Meaning : Learning culture and computers*, Kluwer Academic Publishers, 1996, 270 p. ISBN 0-7923-4073-6
- [PAPERT 1981] PAPERT S., *Jaillissement de l'esprit*, Éditions Flammarion, 1981.
- [PAQUETTE 1991] PAQUETTE G., *Métaconnaissance dans les environnements d'apprentissage*, Thèse de l'Université du Maine, Le Mans, Octobre 1991.
- [PARMENTIER ET VIVET 1991] PARMENTIER C., VIVET M., *Recherche QUADRATURE*, Rapport de recherche pour le Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, 1991.
- [PARMENTIER et al. 1993] PARMENTIER C., MORANDEAU J., VIVET M., *Recherche PLUME*, Rapport de recherche pour le Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, Éditions Cahiers du CARIF - Hors série, 1993.
- [PAVEL 1999] PAVEL P., GD.Visu@l *Environnement Distribué Interactif pour l'Apprentissage Humain de la Géométrie Descriptive*, Thèse de l'Université du Maine, 5 novembre, 1999.
- [PITRAT 1990] PITRAT J., *Métaconnaissance, Futur de l'Intelligence Artificielle*, Hermès, 1990.
- [PITRAT 2000] PITRAT J., *Comment et pourquoi méta-expliquer ?*, dans ce numéro.
- [ROBERT et al. 1987] ROBERT A., ROGALSKI J., SAMURCAY R., *Enseigner des méthodes*, Cahier de Didactique des Mathématiques n° 38, Irem, Université Paris 7, 1987.
- [ROGALSKI 1988] ROGALSKI M., *Comment chercher une primitive? Question de méthode...*, Polycopié DEUG A1, Université des Sciences et Techniques de Lille, 1988.
- [ROGALSKI 1990] ROGALSKI M., *Enseigner des méthodes en mathématiques.*, In Commission Inter-Irem Université, Enseigner autrement les mathématiques en DEUG A première année, bulletin Inter-Irem, 1990, p. 65-79.
- [ROULET et al. 1985] ROULET E., AUCHLIN A., MÆSCHLER J., RUBATTEL C., SCHELLING M., *L'articulation du discours en français contemporain*, Peter Lang, Berne.
- [SCHULER ET NAMIOKA 1993] SCHULER D., NAMIOKA A., *Participatory design : Principles and practices*, Erlbaum, Hillsdale, N.J., 1993, 320 p. ISBN 0-8058-0951-1

- [SELF 1987] SELF J., Students Models : *What Use Are They?*, Proceedings of the IFIP TC3 working conference on artificial intelligence tools in education, Ed. P. Ercoli & R. Lewis, North Holland, 1987, 432 p.
- [SERE ET WEIL 1991] SERE M.- G., WEIL-BARAIS A., *L'explication dans l'enseignement et l'EIAO*, Actes du colloque Esprit : Edition Paris Onze, 1991, 260 p.
- [SPERANDIO 1993] SPERANDIO J.-C., *L'ergonomie dans la conception des projets informatiques*, Octares éditions, 1993, 450 p.
- [TCHOUNIKINE 1998] Pierre TCHOUNIKINE, *MAPCAR, une approche pour l'élaboration du modèle conceptuel de raisonnement d'un système à base de connaissances*, Habilitation à diriger des recherches, Université de Nantes, Janvier 1998.
- [TEUTSCH 1994] Ph. TEUTSCH, *Environnements Interactifs et Langues Étrangères, Marple : système d'évaluation et de suivi de formation*, Thèse de l'Université du Maine, Le Mans, janvier 1994, 230 pages.
- [TEUTSCH 1996] TEUTSCH Ph., *Un modèle de situation d'évaluation pour le suivi de formation en langue étrangère*, ITS'96 Intelligent Tutoring Systems, Montréal, juin 1996, p. 315-323.
- [TEUTSCH ET VIVET 1993] TEUTSCH PH., VIVET M., *Interaction Issues for Marple, a system for evaluation in Foreign Language Training*, Actes de AIED'93, Edimbourg, 590.
- [VIVET 1973] VIVET M., *Un programme qui vérifie des identités en utilisant le raisonnement par récurrence*, Thèse de Troisième cycle, Université Paris 6, 1973.
- [VIVET 1980] VIVET M., *Type de pédagogie mise en œuvre en apprentissage autonome*, Annexe 1 du rapport SIMON au Président de la République sur "L'éducation et informatisation de la société", La Documentation Française, p. 201-210.
- [VIVET 1984] VIVET M., *Expertise mathématique et informatique : Camélia, un logiciel pour raisonner et calculer*, Thèse d'Etat, Université Paris 6, 1984.
- [VIVET 1987] VIVET M., *Systèmes experts pour enseigner : métaconnaissances et explications*, Cognitive 87.
- [VIVET 1988a] VIVET M., *Knowledge based tutors : towards the design of a shell*, International Journal of Educational Research, vol 12 n°8, p. 839-850.
- [VIVET 1988b] VIVET M., *Examination of two ways for research in advanced educational technology*, NATO, Milton Keynes, november 11/12, 1988.
- [VIVET 1989] VIVET M., *Micro-robots as a source of motivation for geometry*, Intelligent Learning Environments : The Case of Geometry, NATO ASI Series F, vol. 117, 1989, Éditions Berlin : Springer-Verlag, p. 231-245.

- [VIVET, 1990] VIVET M., 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.
- [VIVET 1991a] VIVET M., *Usage des tuteurs intelligents : prise en compte du contexte, rôle du maître*, Actes des Journées EIAO, PRC-IA, Editions de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 1991, p.247-252.
- [VIVET 1991b] VIVET M., *Modos de modelización en robótica pedagógica*, Actes du 5^e colloque international sur la robotique pédagogique, Mexico, Mexique., 5-8 juillet 1991, Éditions, Universidad Nacional Autónoma de México, p. 337-344.
- [VIVET 1993] VIVET M., *La réception des productions des apprenants : une phase essentielle dans la conduite des projets*, Actes du 4^e colloque international sur la robotique pédagogique, Liège, Belgique, 5-8 juillet 1993, Éditions Université de Liège – INRP, p. 117-134.
- [VIVET 1999] VIVET M. (Eds), *Artificial Intelligence in Education – Designing learning environments – A long story in Le Mans...*, Brochure de la conférence AIED'99, Le Mans Juillet 1999.
- [VIVET 2000a] VIVET M., *Des robots pour apprendre*, dans ce numéro, texte écrit en 1988.
- [VIVET 2000 b] VIVET M., *Tic et IUFM : éléments de réflexion et points de vue*, Conférence prononcée à la réunion des directeurs d'IUFM en 1999, dans ce numéro.
- [VIVET et al. 1988a] VIVET M., FUTTERSACK M., LABAT J. M., *Métaconnaissance dans les tuteurs intelligents*, ITS 88, pp 430-434, Montréal 1988.
- [VIVET ET AL. 1988b] VIVET M., DELOZANNE E., CARRIERE E., *Presentation of different aspects of Amalia : a knowledge based tutor of mathematics*, Actes de l'Université Européenne sur les Tuteurs Intelligents, Le Mans, 1988, p. 155-170.
- [VIVET et al. 1991] VIVET M., BRUNEAU J., PARMENTIER C., *Learning with micro-robotics activities*, Integrating Advanced Technology into Education, NATO ASI Series F, vol. 78, 1991, Éditions Berlin : Springer-Verlag, p. 139-148.
- [VIVET et al. 1999], VIVET M., BEACCO J.C., TEUTSCH Ph., GUEYE O., Di GIURA M., TAUZER-SABATELLI F., *Croisières, le Français pour Débutants sur Internet*, Deuxièmes Entretiens Internationaux du CNED, Poitiers-Futuroscope, sous presse.
- [VIVET et LEHUEN 1998], VIVET M., LEHUEN J., *Allons nous apprendre avec des machines qui apprennent ?*, Actes de CAPS'98, Caen, 153-158.