Nécessité et richesse d'une interaction entre concepteurs des outils informatiques, didacticiens et formateurs dans l'enseignement des mathématiques

Mme Dominique GUIN, équipe ERES, Université Montpellier 2.

0 A quoi peut servir un outil informatique dans l'enseignement?

Si l'objectif visé dans la conception d'outils technologiques est la mise en place d'un *milieu* qui favorise l'apprentissage par l'*adaptation* qu'il nécessite de la part de l'élève, cet objectif ne peut être atteint sans une *interaction* transdiciplinaire entre informaticiens, didacticiens et formateurs.

Lorsque nous choisissons d'employer un dispositif différent, nous souhaitons qu'il permette à nos élèves de *modifier* le regard qu'ils portent sur les mathématiques. Ce dispositif va modifier l'environnement, il apportera ses propres contraintes, il mettra en lumière certains aspects des mathématiques et projettera son ombre sur d'autres [Canet 94].

C'est l'adaptation à la composante *active* du milieu qui doit provoquer l'apprentissage [Artigue 94]. Ainsi, les outils technologiques permettant une approche graphique de l'analyse ouvrent la possibilité d'un travail spécifique sur l'*articulation* des registres algébrique et graphique qui n'est pas envisageable dans l'environnement traditionnel. C'est ce travail qui va provoquer chez l'élève une *réorganisation* des connaissances : M. Artigue, en évoquant la recherche pilotée par A. Schoenfeld, met en évidence que, pour arriver à une conception de la pente correctement articulée entre les pôles algébrique et graphique, c'est tout un *réseau cognitif* qu'il faut modifier.

Les outils cognitifs que R. Pea nomme "cognitive technologies" [Pea 87] ont donc un rôle d'*amplification*, mais aussi de *réorganisation* des connaissances : ils permettent non seulement de "faire plus et plus vite", mais aussi de "faire autrement" en utilisant la spécificité du milieu. Ainsi, par exemple, on peut envisager d'utiliser la facilité du changement de registres pour modifier les procédures de résolution en interprétant, validant ou conjecturant des faits [Canet 94]. La maîtrise de ces procédures manifestera une nouvelle structuration des connaissances dans la conceptualisation mathématique de la notion de fonction.

Lors de la mise au point des premiers logiciels éducatifs, les objectifs à atteindre dans la conception de ces outils technologiques n'étaient pas explicités, et c'est l'expérimentation de ces logiciels (souvent produits par des individus informaticiens ou enseignants en mathématiques) qui a permis de préciser la demande des didacticiens, formateurs et enseignants. C'est pourquoi la nécessité de l'interaction transdiciplinaire entre informaticiens, didacticiens et formateurs ne paraissait pas si cruciale à l'époque.

Au cours des dix dernières années cette interaction s'est développée progressivement. Nous pouvons déjà entrevoir l'avance significative qu'elle permet dans chaque discipline. Nous présenterons succinctement quelques exemples afin d'argumenter cette prise de position.

I Un outil technologique de grande notoriété peut s'avérer inadapté pour l'enseignement

Considérons le fameux tuteur intelligent Geometry Proof Tutor conçu par une équipe de chercheurs en Intelligence Artificielle aux USA qui a fait l'objet de plusieurs articles dans des revues internationales d'Intelligence Artificielle [par ex : Anderson & al 87]. Après l'élaboration d'une théorie générale de la cognition ACT*, J.R. Anderson s'est intéressé à la conception de tutoriels intelligents simultanément pour appliquer cette théorie et valider ses hypothèses.

Le groupe Intelligence Artificielle de l'I.R.E.M. de Strasbourg, composé essentiellement d'enseignants en Mathématiques de l'enseignement secondaire, travaillait à la modélisation des connaissances nécessaires à la conception d'un environnement informatique d'apprentissage pour la démonstration géométrique. Après une étude des logiciels disponibles à l'époque [Guin & Groupe IA 89], il était naturel qu'il s'intéresse à Geometry Tutor : pour une analyse détaillée du système Geometry Tutor, l'on pourra consulter [Guin & Groupe IA 91]. L'analyse a révélé des insuffisances importantes dans les expertises mathématique et pédagogique du logiciel (imprécision dans les règles et les énoncés, figures très fréquemment particulières, formalisme excessif, choix des exercices et des types d'aide très discutable etc.).

Ces insuffisances étaient assez importantes pour que les enseignants (formateurs pourtant particulièrement enthousiastes pour l'intégration des outils informatiques...) estiment ne pas pouvoir l'utiliser dans leurs classes : sans doute est-ce une conséquence du fait que les fichiers d'exercices ont été constitués par *un seul enseignant* qui "expérimentait" le logiciel dans sa classe? Quel peut être le *rôle* de l'enseignant dans une expérimentation d'enseignement intégrant Geometry Tutor ? Il semble que ce rôle n'ait pas été prévu par J.R. Anderson au moment de la conception du tutoriel. L'enseignant est pourtant indispensable pour *expliquer* le comportement du tuteur, incompréhensible pour l'élève. En effet, l'interaction tuteur-élève est trop figée pour que le logiciel fonctionne sans intervention de l'enseignant.

L'élève ne peut proposer une démonstration *parfaitement correcte*, si la solution correspondante n'a pas été prévue par le tuteur. En outre, l'élève sera guidé de la même manière au bout de deux essais infructueux, que le nom de la règle qu'il propose soit inexact ou qu'il n'en propose pas. En ce qui concerne le diagnostic des erreurs, il paraît nécessaire d'un point de vue pédagogique de préciser le *type* d'erreur : pour que l'élève progresse, il doit comprendre la nature de l'erreur. C'est d'autant plus vrai lorsque "l'erreur" consiste à ne pas travailler dans le contexte souhaité par l'enseignant qui a conçu les exercices!

Mais le *conflit* entre le fonctionnement du logiciel et l'interaction didactique souhaitée par les enseignants est plus profond :

Dans Geometry Tutor, l'élève n'a pas la charge du décodage de l'énoncé puisqu'il lui est présenté avec les hypothèses et la conclusion déjà mises en évidence. La tâche demandée est trop *localisée* pour qu'il y ait erreur sur les *statuts opératoires* des assertions. Dans ces conditions, il est très difficile pour l'élève de prendre conscience de ces statuts, alors que leur reconnaissance est une condition nécessaire pour la compréhension du processus de la démonstration.

L'activité demandée est un mélange de tâche heuristique (choix d'un théorème) et d'organisation déductive. La démarche imposée de *pas à pas* est souvent un obstacle à la découverte de la démonstration. De plus, celle-ci n'est pas forcément une combinaison de marche avant et arrière, la *reconnaissance d'un plan* ou d'une *figure prototype* ne peut pas être prise en compte : l'élève expert doit travailler comme le novice. L'élève n'a pas non plus la possibilité de tester un plan pour comprendre pourquoi il échoue afin de l'améliorer. Pour une mise au point de la démonstration, il est nécessaire de pouvoir choisir le niveau auquel on travaille et de pouvoir procéder par *approximations successives*, méthode aux antipodes d'une réaction immédiate aux erreurs.

Enfin, remarquons que les divergences s'étendent jusqu'au désaccord sur le *choix* des situation-problèmes. Les exercices proposés font très souvent appel à des règles de calcul et ne permettent pas une réelle réflexion sur des objets géométriques. De plus, les exercices proposés sont soit d'une complexité artificielle parce qu'utilisant des règles de calcul peu explicitées dans l'enseignement comme la substitution ou la transitivité de l'égalité, soit très simples : il faut fréquemment appliquer une seule règle pour arriver à la conclusion [Guin & Groupe IA 91].

L'origine de ces divergences se situe dans la théorie cognitive ACT* qui conçoit l'apprentissage comme un processus relativement simple, une fois le "découpage" des connaissances effectué. Les enseignants confrontés à l'apprentissage de la démonstration géométrique peuvent difficilement adhérer à cette théorie. Enfin, le rejet de ce tuteur par les enseignants les plus motivés n'est pas spécifique à la France : la situation aux USA est analogue, même si les enseignements sont très différents. Le fait le plus intéressant à signaler est l'étonnement de la communauté internationale d'Intelligence Artificielle qui considérait à l'époque ce tuteur comme le modèle du genre; elle se trouvait confrontée aux conséquences de l'absence d'interaction entre les différentes communautés..

II Un outil technologique inadapté peut être à l'origine de recherches didactiques hors contexte technologique

Malgré toutes les réserves émises précédemment, les enseignants avaient été fortement intéressés par la possibilité dans Geometry Tutor d'avoir une représentaton sous forme de *réseau* de la démonstration. Leur intuition était que cet outil pourrait s'avérer efficace hors contexte informatique dans l'enseignement de la démonstration en géométrie. Le groupe IA de l'IREM de Strasbourg, et en particulier M.-A. Egret a donc entrepris une expérimentation dans ce sens avec la collaboration de R. Duval. Les premières publications [Duval & Egret 89 ; Egret & Duval 89] développaient les bases de l'utilisation des réseaux déductifs comme objets *transitionnels* pour la prise de conscience par les élèves de ce qu'est une démarche de démonstration. Ces articles ont depuis été largement diffusés dans le réseau des IREM et ont été suivis par des publications au niveau international.

Une deuxième conséquence de cette analyse de logiciels de géométrie par le groupe IREM de Strasbourg est la mise en évidence d'implicites dans la démarche des "experts" en démonstration géométrique : on découvrit la variété et la subtilité de leur démarche jusque dans les exercices les plus simples. Cette prise de conscience conduisit à s'interroger sur la manière d'enseigner. L'observation du comportement de l'expert en géométrie a permis d'expliciter des *métaconnaissances* [1] dans certains domaines, tels que les problèmes liés à la cocyclicité ou la relation de Chasles [Vogel 94]. Ces métaconnaissances constituent un aspect fondamental du raisonnement géométrique, et peuvent être à l'origine d'une remise en question de notre enseignement, pourvu qu'il ne se fige pas en fiches-méthodes [Kuntz 94]!

III Les critiques portées sur un outil technologique peuvent également être à l'origine de nouvelles recherches en IA

L'une des raisons qui permet d'expliquer le phénomène décrit en I est le nombre d'enseignants en géométrie qui ont participé à ce projet : l'on constate la présence d'un *seul* enseignant qui expérimentait le logiciel dans une classe de faible effectif parmi des chercheurs informaticiens et cogniticiens. Ce fait suffit amplement à expliquer les erreurs signalées dans la base de connaissances du logiciel, et les choix didactiques souvent surprenants!

Face à ces réactions des enseignants, les auteurs ont repris le projet pour concevoir un nouveau logiciel Angle [Koedinger K.R. & Anderson 90], qui prend en compte les remarques des enseignants, en particulier l'importance des figures *prototypes* et configurations géométriques et la nécessité d'une plus grande souplesse du logiciel. Remarquons tout de même que les quelques articles écrits par les enseignants qui utilisent ce nouveau logiciel portent une fois de plus sur le fonctionnement du logiciel, mais ne donnent aucune information sur le déroulement de la séquence d'enseignement dans laquelle il est censé s'intégrer...

En France, un réinvestissement important des recherches développées au sein du groupe Intelligence Artificielle de l'I.R.E.M. de Strasbourg a été réalisé grâce à l'Université d'été Informatique et Enseignement de la géométrie organisée par R. Cuppens [Toulouse 90] qui a permis un premier contact entre les chercheurs de l'Intelligence Artificielle, les didacticiens, les formateurs et les enseignants : l'influence de cette université est sensible dans les travaux présentés ci-dessous.

Le projet CHYPRE [Bernat 93 a & b]

P. Bernat propose l'architecture d'un système d'aide au raisonnement sans contrainte, qui ne comprend pas de résolveur. Ce système, qui utilise le logiciel Calques Géométriques pour construire la figure [2], suit l'élève dans son travail sans lui imposer une démarche prédéfinie. Il privilégie l'activité de *recherche* d'une démonstration en intégrant plusieurs fonctionnalités souhaitées dans le cahier des charges du groupe IA de l'IREM de Strasbourg [Guin & Groupe IA 91] : l'élève peut créer progressivement le réseau associé à son raisonnement, sans aucune contrainte de fonctionnement (pas à pas, marche avant ou marche arrière), il peut ainsi chercher un *plan de démonstration* à partir de faits non prouvés qui ont le statut de conjecture. Le logiciel permet ainsi de "sauter", dans un premier temps, certains pas de démonstration.

---

[1] Les connaissances sur les connaissances : les connaissances qui sont des propriétés des connaissances, les connaissances actives (qui manipulent des connaissances).

[2] Du même auteur.

Il offre donc les possibilités d'un raisonnement *non linéaire* et d'une vision *moins locale* de la démonstration. La modélisation du raisonnement sous-jacente prend en compte la notion de *prégnance* [3] d'un objet géométrique et ses conséquences sur la réorganisation des connaissances.

Le projet MENTONIEZH [EIAO 93 ; Py 94]

D. Py a réalisé un système d'aide à la démonstration en géométrie plane (niveau 4ème) qui guide et corrige l'élève durant deux phases de la résolution de problèmes : tracé de la figure et élaboration de la démonstration (une version IBM PC et compatibles est disponible). L'expertise du domaine est détenue par un démonstrateur qui détermine à l'avance les différentes solutions d'un problème. Le modèle de l'élève est basé sur la *reconnaissance du plan* de démonstration de l'élève : il y a interprétation du chemin suivi par l'élève et le professeur peut préciser des consignes pour *adapter* le comportement du tuteur. Le modèle de *diagnostic a priori* a révélé des insuffisances au cours des expérimentations qui ont été réalisées, un ensemble d'heuristiques pour la recherche du type d'erreur permet à partir des traces de sessions de préciser le diagnostic. Cette recherche met en évidence qu'un diagnostic basé sur la cohérence interne d'un pas de déduction ne suffit pas, et qu'il est nécessaire de faire intervenir le *contexte* (problème et état de la résolution) pour obtenir un diagnostic plus efficace.

Le projet GEOMUS [Bazin 93 ; EIAO 93]

J.-M. Bazin propose un modèle de l'expert en résolution de problèmes en géométrie qui enrichit le problème grâce à la figure où il *reconnait* des sous-figures. Grâce à ces figures extraites et aux relations structurelles établies à la lecture de l'énoncé, il peut *étiqueter* le problème. L'expert *mobilise* ensuite les connaissances et *métaconnaissances* associées à une étiquette, c'est ce qui lui permet de résoudre le problème. Il s'agit donc d'un *résolveur automatique* dans le domaine de la démonstration en géométrie plane (niveau 4ème) exploitable dans un *contexte didactique*, c'est à dire que les stratégies de résolution veulent être proches d'un *comportement humain* (en l'occurrence, celui du professeur) et *compréhensibles* pour les élèves.

Pour une idée plus précise des recherches précitées, l'on pourra trouver un article concernant ces trois projets d'Intelligence Artificielle dans [EIAO 93] ; en ce qui concerne l'interaction, signalons que deux d'entre eux sont des enseignants en Mathématiques et que P. Bernat, auteur du logiciel Calques géométriques (dont certaines applications sont présentées dans cette brochure), est un membre actif de la commission inter-IREM Informatique depuis de nombreuses années! Enfin, D. Py, qui n'est pas enseignante en Mathématiques, a fréquenté plusieurs universités d'été organisées dans le cadre du réseau des IREM où elle cherchait à recueillir le maximum de réactions de la part des enseignants.

---

3 "Force et par suite stabilité et fréquence d'une organisation psychologique privilégiée, parmi toutes celles qui sont possibles" (Guillaume in Petit Robert).

IV Comment accélérer le processus pour la conception d'outils satisfaisant les utilisateurs ?

L'exemple modèle dans ce domaine concerne le projet Cabri-Géomètre (J.-M. Laborde) qui regroupe une équipe de recherche interdisciplinaire. L'on peut signaler très brièvement les étapes fondamentales du processus de développement de ce projet :

* Tout d'abord, une intervention *en amont de la conception* de didacticiens et d'enseignants pour définir un cahier des charges, puis :

* La thèse de F. Bellemain [Bellemain 92] : Conception, réalisation et expérimentation d'un logiciel d'aide à l'enseignement de la géométrie : CABRI-Géomètre,

* La création d'un journal des utilisateurs : CABRIOLE en liaison avec les concepteurs, qui donne les moyens d'une *communication effective*.

L'article [Bellemain & Capponi 1992] décrit l'expérimentation menée pour étudier les problèmes spécifiques posés par l'introduction du logiciel dans la classe. Ces problèmes sont à la fois relatifs à la *gestion* par l'enseignant de la classe et à l'élaboration de situations permettant à l'élève de *construire*, grâce à l'ordinateur, de nouvelles connaissances qu'il puisse *réinvestir* dans la résolution de problèmes issus d'environnements *différents* de celui du logiciel.

Les auteurs exposent les *choix* effectués en réponse à ces problèmes. Ces choix sont présentés au travers de l'exemple de la construction d'une séquence d'enseignement visant l'acquisition par les élèves de propriétés géométriques de la *symétrie orthogonale* au cours de l'utilisation du micro-monde Cabri-géomètre. Les auteurs décrivent ensuite les observations effectuées lors de la mise en oeuvre de la séquence qui permettent d'*évaluer* les problèmes posés par l'introduction de l'ordinateur dans la classe et de tester la *pertinence* des choix entrepris.

Cette étude se place dans le cadre *constructiviste,* c'est-à-dire de la construction des connaissances par la résolution de problèmes. L'objectif est que l'élève s'engage dans la résolution de problème en s'appuyant sur la *mise en évidence de propriétés géométriques* dans l'exploration de figures rendue possible grâce à Cabri-géomètre.

L'*interaction* avec l'ordinateur permet à l'élève de *valider* les actions qu'il entreprend. Ceci implique que l'élève soit capable de *repérer* er d'*interpréter* une action erronée, ce qui n'est pas toujours le cas : l'enseignant pourra être conduit à intervenir pour aider l'élève dans cette tâche.

De même les connaissances construites par l'élève sont liées au *contexte* du problème et à l'environnement informatique : l'enseignant doit donc consacrer des phases (dites d'*institutionnalisation*) à *identifier* parmi les savoir et savoir-faire apparus localement, ceux qui constituent désormais des nouvelles connaissances : il pointe les notions qui constitueront de nouvelles connaissances utilisables dans d'*autres situations*.

Ce nouveau contrat doit être négocié dans une phase préalable qui est indispensable pour le bon fonctionnement de la démarche visée, afin de donner aux élèves l'accès à la *signification* de la possibilité de déplacement dans Cabri-géomètre. C'est pourquoi la séquence d'enseignement comporte, après deux séances sur les logiciels Mac Write et Mac

Paint pour une familiarisation avec l'interface Macintosh de Apple, deux autres séances consacrées à la construction de la médiatrice d'un segment avec le logiciel Mac Paint (3ème séance), puis avec Cabri-géomètre (4ème séance) sans la possibilité d'accès à *symétrique* et *médiatrice* dans les menus. Ce n'est qu'à la 5ème séance que les élèves auront accès aux possibilités de *validation* du logiciel (grâce au critère de déplacement) et au nouveau contrat (procédure de construction d'une *classe* de figures) pour construire, à nouveau, la médiatrice d'un segment et un parallélogramme.

Après une mise en commun des observations et un *bilan* fait par l'enseignant (6ème séance, comparaison du comportement de deux figures apparemment identiques par déplacement, phase d'*institutionnalisation*), une nouvelle situation est proposée aux élèves dans un *autre* environnement, l'environnement papier/crayon (7ème séance, phase de *transfert*). La tâche est de décrire oralement, puis par écrit ce qu'ils observent sur un ensemble de figures possédant un axe de symétrie. La même activité est reprise dans Cabri-géomètre où les élèves disposent d'un quadrilatère et de son symétrique : ils doivent décrire ce qui semble conservé par déplacement. Cette tâche a pour objectif de conduire les élèves à repérer des *invariants* caractérisant la construction.

En résumé, dans l'environnement Cabri-géomètre, le *rôle de l'enseignant* est nouveau et important :

- avant la mise en place de la situation problème, il doit amener les élèves à accepter le nouveau contrat (procédure de construction d'une *classe* d'objets, *validation* par déplacement),

- pendant la situation problème, il est conduit à confirmer, infirmer ou aider l'élève pour la validation des procédures de construction,

- après la situation problème, il doit *institutionnaliser* les nouvelles acquisitions, car le *transfert* dans un autre environnement n'est pas automatique, il doit, pour ce faire, s'appuyer sur un jeu entre différents environnements.

L'on peut donc affirmer que le projet HYPER-CABRI qui s'appuie sur des expérimentations en classe analysées par des didacticiens relève d'un réel *processus interactif* de développement entre enseignants, élèves, didacticiens et informaticiens. La sortie en 94 de Cabri2 où l'on découvre des fonctionnalités qui avaient été désirées par les formateurs est une confirmation de l'efficacité du processus!

V Mise en place d'un dispositif nécessaire à cette interaction

Un projet de réseau de formation a été développé aux USA [Allen & al 92] dans le but d'aider les enseignants à développer un *système d'exploitation didactique* [Chevallard 92] pour une intégration réussie des logiciels de géométrie dans leur enseignement. Ce projet vise à créer et mettre en place un *processus interactif* dans lequel les enseignants travaillent en *collaboration*. La communication se fait essentiellement sur la base de *scénarios* (matériaux composés de plans de leçons prévoyant une série d'étapes accompagnées d'une documentation écrite : fiche prof - fiche élève).

L'organisation du projet a été conçue pour développer progressivement une structure, il s'agit donc d'un réseau *évolutif* où les différents niveaux sont successivement mis en place.

Niveau 1 : noyau de trois enseignant-chercheurs qui vont progressivement développer les niveaux 2 et 3.

Niveau 2 : Teacher Action group, noyau de dix enseignants du secondaire proches géographiquement qui participent successivement à :

* un stage de deux semaines (Juin 90) :

- Cours de géométrie, informatique et didactique des mathématiques,

- Introduction aux logiciels dont certains seront rejetés (les mêmes qu'au niveau 1) car jugés *contradictoires* auvec les objectifs du projet (par exemple, Geometry Proof Tutor). Il s'agit également d'apprendre à *choisir* un logiciel adapté à la situation.

- Ecriture de *scénarios*, suivi de huit jours de travail personnel pour la mise au point du scénario,

* un stage de deux jours (Sept 90) : mise en commun et critique des scénarios, puis utilisation des scénarios avec l'aide du niveau 1,

* un stage de 2 jours (Jan 91) : *comparaison* et *évaluation* des expériences, préparation de l'étape suivante du projet, définition du *rôle* du niveau 2 vis à vis du niveau 3.

Niveau 3 : Extended Network teachers, formé de quarante enseignants volontaires, proches géographiquement. A ce niveau, le travail est beaucoup moins structuré : il n'y a plus la possibilité de travail personnel de huit jours, plus de stage postérieur de deux jours. Les membres du réseau à ce niveau participent successivement à :

* un stage de 2 semaines (Juin 91) : le travail y est moins "ouvert", pour accorder suffisamment de temps pour l'*élaboration* d'un scénario à expérimenter l'année suivante. Par conséquent, l'on (niveaux 1 et 2) n'y présentera que les logiciels ayant été jugés intéressants au niveau 2, et l'on y fournira également des *scénarios prototypes*. Il faut signaler la *forte participation* dans l'animation du niveau 2 , ainsi les cinquante enseignants forment réellement un *réseau*.

* Année 91-92 : expérimentation de 4 scénarios (dont 1 personnel, adaptation des 3 autres). Le contact avec le niveau 2 est maintenu grâce à des réunions régulières.

* Création d'un journal périodique, réunions et communications dans divers congrès, enfin atelier de deux jours (Jan 92) pour informer et soutenir le réseau.

Niveau 4 : Extension du réseau

Ce niveau sera plus *informel* : les niveaux 2 et 3 servent d'animateurs pour les enseignants de leurs établissements, fournissent des scénarios à expérimenter, ils ont la possibilité de communiquer au niveau national par *courrier électronique*.

Durant le bilan de ce projet réalisé au congrès national (Juin 92) qui s'avère positif, l'on signale toutefois certaines difficultés liées aux *réticences* des enseignants qui ont l'habitude de suivre de très près l'ordre d'un manuel, aux réticences des directeurs d'établissement qui redoutent un changement trop radical, et surtout un obstacle lié au fait que l'enseignement de la géométrie est réalisé aux USA sur *une seule année* (2^{nde}).

A la question : "Quels sont les éléments d'un programme de formation continue destinés à des enseignants de géométrie visant une intégration efficace des outils informatiques dans leur démarche pédagogique ?", ce projet apporte une réponse possible, mais il exige des *moyens importants*, et surtout en priorité des périodes de travail et de réflexion suffisamment *nombreuses et fréquentes*. Pour faciliter l'*évolution* des enseignants et les soutenir, il est non seulement nécessaire de *créer*, mais encore de *maintenir* des réseaux étendus comportant des éléments humains et matériels. Pour que les enseignants acquièrent les connaissances et la confiance en soi nécessaires pour intégrer réellement dans leurs pratiques les outils informatiques.

Observera-t-on un changement des conceptions et des comportements des enseignants à long terme ? Les premiers résultats semblent encourageants, mais une réelle évaluation doit être mise en place.

VI Nécessité d'une interaction entre concepteurs didacticiens et formateurs

Actuellement, outre ceux mentionnés au § III et IV, plusieurs projets se développent avec une telle démarche [EIAO 91&93 ; RDM 94], citons plus particulièrement :

Le projet DEFI [Saddo & Giorgiutti 94] :

Le logiciel d'aide à la démonstration en géométrie DEFI, réalisé par I. Giorgiutti, fonctionne sur Macintosh. Il présente l'intérêt de regrouper la phase d'exploration et de démonstration en géométrie ($4^{ème}$), mais l'interaction au cours de l'exploration de la figure est relativement rigide : l'élèvé répond aux questions successives du logiciel sans avoir le *contrôle* de la stratégie d'exploration. L'absence de démonstrateur automatique est une limitation : certaines erreurs ne peuvent être détectées, le logiciel ne peut pas toujours décider si la réponse est juste ou non. Par exemple, il est impossible de décider si un pas de preuve correct est utile ou non dans la démonstration.

Le projet est essentiellement centré sur la modélisation de l'élève : l'accent est mis sur la possibilité de traiter les données recueillies à l'interface du logiciel pour élaborer un ensemble d'explications adaptées à l'élève. L'analyse implicative est l'outil essentiel utilisé pour le travail d'analyse des productions des élèves. Une typologie des facteurs comportementaux d'élèves est mise en évidence, où le *temps* est un paramètre plus particulièrement étudié.

Le projet APLUSIX [Nicaud 94] :

Ce projet concerne la factorisation de polynômes, plusieurs prototypes ont été ainsi réalisés sur Macintosh. L'idée originale de ce projet est de décrire des modèles *à niveau connaissance*, ie à un niveau où les connaissances sont détaillées sans pour autant être exprimées en langage informatique : elles sont compréhensibles et exécutables par des humains mobilisant des connaissances générales.

* Le *modèle du domaine algébrique* des problèmes qui définit les structures, représentations et concepts du domaine étudié et propose trois niveaux sémantiques pour des classes de problèmes d'algèbre.

* Le *modèle de recherche heuristique* qui est un modèle de résolveur de référence (modèle expert) ayant une plus forte *plausibilité cognitive* que ceux conçus pour un traitement automatique. Le comportement de ce résolveur doit pouvoir être fourni comme exemple à un apprenant du domaine.

* Le *modèle de conception de la factorisation* des polynômes qui est une théorie stratégique de la factorisation par transformations d'expressions.

* Le *modèle d'agent pédagogique* qui a pour rôle d'analyser les demandes d'action et d'apporter de l'aide sur demande de l'élève. Il utilise les concepts du résolveur de référence.

Le projet ELISE [Delozanne 94] :

ELISE est un projet pluridisciplinaire dont l'objectif est la conception d'un logiciel à base de connaissances pour permettre à des étudiants de l'enseignement scientifique d'acquérir des savoir-faire sur les calculs de primitives par la résolution de problèmes et les explications. Une maquette a été testée auprès de trente étudiants et huit enseignants (réalisation d'un prototype sur Macintosh) pour définir l'interaction souhaitée.

Le problème reste celui de la reconnaissance réelle de ce processus dans le milieu universitaire, où les recherches à caractère interdisciplinaire n'ont pas un statut parfaitement clair, mais le processus est amorcé. La nécessité de cette interaction est actuellement reconnue par les informaticiens de l'EIAO, situation fort différente de celle que l'on pouvait observer cinq ans ans auparavant. Cela se concrétise par le fait que sont régulièrement organisées des journées internationales sur les Environnements d'apprentissage interactifs sous le patronnage du GR Didactique et du PRC Intelligence Artificielle [EIAO 91 & 93].

En conclusion, soulignons le rôle fondamental des *formateurs* dans le *cycle de la conception*. Leur regard est fort différent de celui du chercheur didacticien par le contact régulier qu'ils ont avec les enseignants qui travaillent dans des conditions très différentes. Rappelons qu'il nous semble fondamental que les formateurs aient connaissance des résultats des recherches en Didactique afin de pouvoir les prendre en compte dans leur formation. Enfin, il paraît intéressant de développer des réseaux évolutifs de formation. C'est sans doute une des conditions nécessaires pour une réelle intégration des outils informatiques dans l'enseignement des Mathématiques.

Bibliographie

ALLEN, CEDERBERG, WALLACE, 1992 - *L'intégration de l'ordinateur dans l'enseignement de la géométrie en tant que projet de formation continue* , Séminaire de Didactique, IREM de Rennes.

ANDERSON, BOYLE, FARELL, REISER, 1987 - *Cognitive principles in the design of computer tutors*, Modelling Cognition, pp. 93-133, P. Morris, John Wiley & Sons ltd.

ARTIGUE, 1994 - Ibidem.

BAZIN, 1993 - *Geomus : un résolveur de problèmes de géométrie qui mobilise ses connaissances en fonction du problème posé*, Thèse de doctorat, Université Paris VI TH93/06.

BELLEMAIN, 1992 - *Conception, réalisation et expérimentation d'un logiciel d'aide à l'enseignement de la géométrie : Cabri-Géomètre*, thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble.

BELLEMAIN, CAPPONI, 1992 - *Spécificité de l'organisation d'une séquence d'enseignement lors de l'utilisation de l'ordinateur*, Educational Studies in Mathematics, vol 23, pp. 59-97.

BERNAT, 1993 a - *Pour une aide au raisonnement non linéaire basée sur la prégnance*, Environnements Interactifs d'apprentissage avec Ordinateur, Eyrolles.

BERNAT, 1993 b - *Un logiciel d'aide au raisonnement*, Repères, vol 10, pp. 25-48.

CANET, 1994 - *Exemple d'utilisation d'un système de mathématique symbolique*, DEA de Didactique des Disciplines Scientifiques, Université Montpellier 2, IREM de Montpellier.

CHEVALLARD, 1992 - *Intégration et viabilité des objets informatiques dans l'enseignement des mathématiques*. L'ordinateur pour enseigner les mathématiques, éd B. Cornu, PUF.

DUVAL & EGRET, 1989 - *L'organisation déductive du discours*, Annales de Didactique et de Sciences Cognitives, vol 2, pp .25-40, IREM de Strasbourg.

DELOZANNE, 1994 - *Un projet pluridisciplinaire : ELISE un logiciel pour donner des leçons de méthode*, Recherches en didactique des mathématiques, vol 14 / 1-2, La Pensée sauvage.

EIAO, 1991 : Actes des 2$^{\text{èmes}}$ journées de Cachan, ENS Cachan.

EIAO, 1993 : Environnements Interactifs d'apprentissage avec Ordinateur, Eyrolles.

EGRET & DUVAL, 1989 - *Comment une classe de 4$^{\text{ème}}$ a pris conscience de ce qu'est une démarche de démonstration*, Annales de Didactique et de Sciences cognitives, vol 2, pp .41-65, IREM de Strasbourg.

GUIN & GIA, 1989 - *Réflexion sur les logiciels d'aide à la démonstration géométrique*, Annales de Didactique et de Sciences Cognitives, vol 2, pp .89-109, IREM de Strasbourg.

GUIN & GIA, 1991 - *Modélisation de la démonstration géométrique dans Geometry Tutor*, Annales de Didactique et de Sciences Cognitives, vol 4, pp .5-40, IREM de Strasbourg.

KOEDINGER, ANDERSON, 1990 - *Abstract planning and perceptual chunks : elements of expertise in geometry*, Cognitive Science, 14, pp.511-550.

KUNTZ, 1994 - *De l'Intelligence Artificielle aux fiches méthodes*, Repères, vol 16, pp. 11-27.

NICAUD, 1994 - *Modélisation en EIAO, les modèles d'Aplusix*, Recherches en didactique des mathématiques, vol 14 / 1-2, La Pensée sauvage.

PEA, 1987 - *Cognitive technologies for mathematics education*. In A.Schoenfeld (Ed). Cognitive Science and Mathematical Education, Hillsdale, N.J LEA publishers, 89-122.

PY, 1994 - *Reconnaissance de plan pour la modélisation de l'élève : le projet Mentoniezh*, Recherches en didactique des mathématiques, vol 14 / 1-2, La Pensée sauvage.

RDM, 1994 - Recherches en didactique des mathématiques, vol 14 / 1-2, La Pensée sauvage.

SADDO & GIORGIUTTI , 1994, *DEFI : outil didactique et d'aide à la recherche en EIAO*, Recherches en didactique des mathématiques, vol 14 / 1-2, La Pensée sauvage.

TOULOUSE, 1990 - Actes de l'Université d'été Informatique et Enseignement de la géométrie, IREM de Toulouse.

VOGEL, 1994 - *Quelques repères pour apprendre à démontrer avec la relation de Chasles en géométrie*, Repères, vol 16, pp. 83-109.