

EXIGENCES EPISTEMOLOGIQUES DES RECHERCHES EN EIAO

Nicolas BALACHEFF ¹

CNRS

Résumé

De par l'objectif poursuivi, l'évaluation d'un environnement d'apprentissage EIAO² ne peut être réalisée sur le seul plan informatique, elle doit poser et répondre à la question de la nature des connaissances construites par l'apprenant au cours de l'interaction avec le dispositif informatique. Cette évaluation est complexe et ne saurait se limiter à rendre compte de comportements. C'est la signification de ces comportements qui est en question, c'est-à-dire ce qu'ils témoignent des relations entre l'apprenant et la connaissance objet de l'apprentissage. Dans le texte qui suit nous esquissons le cadre d'une approche épistémologique et constructiviste de l'apprentissage dans un contexte didactique. C'est dans ce cadre que nous formulons ensuite les questions d'ordre épistémologique dont nous montrons qu'elles sont constitutives de la démarche de modélisation du fonctionnement de systèmes cognitifs, humains et artificiels, et de leurs interactions, qui est l'objet de l'EIAO. Nous terminons en soulignant qu'obligées à une problématique essentiellement épistémologique les recherches en EIAO constituent un paradigme de recherche fondamental de l'Intelligence Artificielle.

1. PERTINENCE D'UN QUESTIONNEMENT EPISTEMOLOGIQUE POUR LA RECHERCHE EN EIAO.

Par épistémologie nous désignons ici l'étude des rapports qu'entretient un individu, ou une communauté, avec un objet de connaissance. Ce peut être notamment l'étude de ces rapports à un moment donné de l'histoire d'une science ou dans le cours de son évolution, c'est l'objet de l'épistémologie historique, ou leur étude dans le cours du développement d'un individu, c'est par exemple l'épistémologie génétique de Piaget.

¹ Laboratoire IRPEACS, 93 Chemin ds Mouilles, BP 167, 69131 Ecully Cédex (mail : balachef@imag.fr)

Cet article a été préparé dans le cadre du projet IMAG de micro-monde intelligent "CABRI-géomètre" conduit par le laboratoire LSD2 (URA 393, IMAG-CNRS et Université Joseph Fourier - Grenoble1).

² EIAO est le sigle pour "Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur". Cette désignation paraît utilisée par la communauté informatique pour distinguer les travaux dans ce domaine de ceux dans le domaine de l'apprentissage au sens du "machine learning", par ailleurs elle est héritée de l'EAO qui la précède historiquement. Bien sûr, "intelligemment" est une référence à l'utilisation des outils de l'intelligence artificielle, mais quoiqu'il en soit ce sigle peut sembler limiter l'approche à certains types de systèmes, excluant par exemple les micromondes. Une désignation telle que : "Environnement d'Apprentissage Informatisé", permettrait peut être de mieux rendre compte de toute l'ouverture actuelle du domaine. Quant à la référence à l'IA, il n'est peut être pas nécessaire qu'elle soit explicite ...

Un thème essentiel de l'épistémologie est celui de l'élucidation de la question du sens, de son origine et de son évolution dans le cours de l'histoire, individuelle ou collective, d'une connaissance. La complexité de cette question tient d'abord à ce que le sens n'est pas directement observable, et qu'il ne peut être tout entier contenu dans la formulation d'une définition. Le concept de nombre, par exemple, ne se laisse pas enfermer dans une déclaration, sa signification ne peut être saisie qu'au travers de ses manifestations symboliques et de son rôle dans la résolution de problèmes. Ainsi, l'écriture décimale est-elle le produit d'un long processus historique, les nombres négatifs étaient-ils contestés comme tels au XIX^e siècle et, enfin, le débat récent sur les entiers non standards a-t-il bien attesté de la complexité du concept "élémentaire" de nombre et de son caractère vivant. Le nombre n'est nulle part "visible", c'est un "construit" légitimé par la force de ses applications et validé par les moyens propres à la science qui l'a élaboré. De la même façon l'histoire cognitive de l'individu atteste de la complexité de cette question du sens. Ainsi, par exemple, le concept de limite ne s'est pas construit pour le mathématicien le jour où, étudiant, la définition formelle lui a été révélée ; il est en revanche le fruit d'une longue élaboration qui le rattache aux nombres réels et il évoluera avec les applications effectives que l'étudiant, puis le chercheur, aura pu en faire.

Faute de pouvoir accéder directement au sens ou de pouvoir l'exprimer dans une définition, nous le décrivons par ses effets attestés par l'activité cognitive qui, elle, est susceptible de produire des observables. Suivant Vergnaud, nous caractérisons le sens d'un concept par trois ensembles étroitement liés : un ensemble de problèmes pour lequel il fournit un moyen fiable et efficace de résolution, un ensemble de procédures (invariants opératoires) outils pour la résolution de ces problèmes, un ensemble de signifiants support d'un langage opératoire pour la description des problèmes et des procédures [Vergnaud 84]. Par exemple, selon qu'il est représenté par une collection d'objets ou par une écriture décimale, le nombre entier naturel ne permet pas d'accéder aux mêmes classes de problèmes, ni de mettre en oeuvre les mêmes procédures. Le sens du concept de nombre n'est pas le même dans les deux cas ; le passage d'un sens à l'autre correspond à l'évolution conceptuelle de la quantité au nombre stricto sensu.

L'analyse épistémologique, qu'elle prenne pour matériau l'histoire collective ou l'histoire individuelle, met en évidence la multiplicité des facteurs en jeu dans la détermination du sens : facteurs d'ordre matériel, social, culturel, ou idéologique. Elle montre le rôle essentiel joué par le contexte social et matériel de l'élaboration d'une connaissance nouvelle, et, tout particulièrement, dans l'apprentissage, sa sensibilité aux caractéristiques des situations d'enseignement ou de formation. Elle montre surtout que la connaissance impose ses propres lois pour accéder à son essence : le problème et les critères du vrai en mathématiques, physique et philosophie ne sont pas réductibles les uns aux autres. Au point que l'on peut

s'interroger sur la pertinence d'un programme de recherche qui ne valoriserait que des approches de la construction des connaissances qui seraient indépendantes du domaine.

C'est pour cela que les recherches en intelligence artificielle qui prennent pour objet l'EIAO ne peuvent échapper au questionnement de l'épistémologie. Les environnements d'apprentissage développés, les technologies mises en œuvre, les savoirs développés au service de ces technologies, doivent être explorés du point de vue de la nature des connaissances qu'ils permettent de construire avec la même exigence que celle qui préside à leur validation au sein de la communauté scientifique dont ils sont les produits.

2. L'ELEVE CONSTRUCTEUR DE SA CONNAISSANCE

Pour ce qui concerne les connaissances complexes, le choix de l'hypothèse constructiviste s'impose actuellement comme le plus fécond. Suivant cette hypothèse, l'apprenant explore son environnement et participe activement à la construction de l'espace, du temps et de la causalité [Inhelder 85]. Cela signifie, pour reprendre la métaphore bien connue de Popper, que l'apprenant n'est pas un seau vide que l'on remplit mais qu'il est, au contraire, l'artisan d'une authentique re-construction de la connaissance. Cette construction peut être décrite comme le résultat d'un processus d'adaptation de l'organisme cognitif (le sujet épistémique de Piaget) aux contraintes des situations dans lesquelles il opère. La connaissance d'un individu est le résultat d'un processus complexe de dépassement d'un déséquilibre cognitif dans lequel son état cognitif initial et une situation particulière l'avaient placé [Piaget 75]. Une classe importante de problèmes dont s'occupe le didacticien est la modélisation des connaissances de l'apprenant ; nous appelons *conception* un tel modèle, relativement à une notion déterminée, pour en marquer le rattachement singulier à la personne. L'acceptation de l'hypothèse constructiviste, et donc d'un modèle d'apprentissage par adaptation, a pour conséquence la nécessité de connaître précisément l'état initial des conceptions attribuées aux élèves et les caractéristiques de la situation dans laquelle l'apprentissage a lieu. Par "situation" nous entendons ici "situation-problème", c'est-à-dire une situation susceptible de créer un déséquilibre (un problème pour l'élève) dont le résultat du dépassement serait la connaissance visée.

Le rôle essentiel joué par les situations problèmes dans la construction d'une connaissance est bien exprimé par Vergnaud [Vergnaud 81] en une formule : les problèmes sont la source et le critère du savoir. Mais les conceptions¹ construites par les élèves dans de telles situations, parce qu'elles résultent d'une adaptation, peuvent avoir un caractère local, porter la

¹ Par un raccourci qui facilite l'expression nous parlons de "conception de l'élève". Le lecteur voudra bien comprendre par là : "conception attribuée à l'élève par le didacticien".

marque originale du contexte de leur élaboration, et finalement être erronées relativement à une connaissance de référence. En atteste le fait que la modification de certaines caractéristiques de ces situations, qui peut paraître insignifiante mesurée à l'aune de l'expertise, peut provoquer des dysfonctionnements importants de l'élève, révélés par la mise en œuvre de procédures inadaptées, voire par des erreurs.

Par exemple, l'introduction de la symétrie orthogonale par le pliage privilégie une conception de cette transformation plane comme une application d'un demi-plan sur l'autre ; mais une telle conception se révélera inadaptée pour la construction du symétrique d'une figure que couperait l'axe de symétrie. Ce problème n'entretient pas avec ceux qui l'ont précédé dans le cours de l'apprentissage une simple relation de complexification, il requiert des élèves une conception de la symétrie orthogonale essentiellement différente de celle qui suffit pour résoudre des problèmes dans lesquels la figure à transformer tient toute entière dans un des demi-plans déterminé par l'axe de symétrie [Grenier 88].

Plus généralement, nous nous intéressons aux erreurs en tant qu'elles peuvent constituer des symptômes de l'existence d'une conception dont on peut montrer qu'elle a par ailleurs un domaine de validité attesté par le succès à résoudre une certaine classe de problèmes. Dans ce sens, une conception, même fautive, est une véritable connaissance ; c'est cette affirmation qui porte à dire : "l'élève connaît, mais il connaît autrement".

Par exemple, des élèves citeront sans hésiter un nombre entre 2,7 et 2,9 mais nieront l'existence d'un nombre entre 3,25 et 3,26. Cette erreur, très répandue, est révélatrice d'une conception du nombre décimal comme nombre entier à virgule [Brousseau 83]. Cependant, cette même conception permet une maîtrise rapide des quatre opérations et la résolution de la plupart des problèmes de la "vie courante".

Le problème didactique soulevé par de tels phénomènes n'est pas seulement d'obtenir la disparition des erreurs comme faits, mais d'en comprendre les origines et de déterminer les conditions de l'évolution des conceptions sous-jacentes. Ce problème est difficile parce que le dépassement d'une contradiction, ou d'un déséquilibre, ne se fait pas nécessairement dans le sens d'un progrès lorsqu'une connaissance complexe est concernée ([Balacheff 88], [Johsua 87]). En particulier, l'adaptation peut avoir un caractère ad hoc en permettant de faire face de façon minimale à la situation rencontrée. Il est bon d'avoir à l'esprit qu'un tel comportement n'est pas le fait des seuls élèves, mais que les communautés savantes peuvent elles aussi tenter d'échapper à la contradiction, préférant parfois "de nouvelles versions et des remaniements ad hoc de leur théorie afin d'éliminer tout conflit apparent" ([Kuhn 70] p.115).

3. COMPLEXITE DE LA CONSTRUCTION DE CONNAISSANCES DANS UN CONTEXTE DIDACTIQUE

Nous adoptons l'hypothèse suivant laquelle la construction de connaissances, en tant que processus d'adaptation cognitive repose sur un principe fondamental d'économie ; pour ce qui nous concerne ici, économie de pensée ou économie de logique. Par exemple, l'élève pourra s'en tenir à des démarches très empiriques s'il éprouve que cela suffit pour réduire significativement son incertitude sur la solution qu'il propose à un problème. Ou encore, dans un contexte d'évaluation, il utilisera une connaissance au lieu d'une autre parce qu'elle est l'objet d'une leçon plus récente et non parce qu'elle est suggérée par une analyse du problème lui-même. Comme tout autre individu, l'élève ne mobilise pas plus de logique que ce qui lui semble nécessaire pour les besoins de sa pratique [Bourdieu 80], mais il peut en résulter que la connaissance élaborée dans ce cadre soit très différente de celle visée. Ces phénomènes sont parfois regardés comme des effets de bord, des bruits auxquels on pourrait remédier par une amélioration de l'interaction entre le professeur et les élèves, ou par une approche des connaissances plus indépendante de ces interactions ou de leur contexte.

L'un des résultats les plus importants des travaux en didactique, en particulier en didactique des mathématiques, est de montrer que de tels phénomènes sont inhérents d'une part à la nature du processus d'adaptation, d'autre part au caractère didactique des situations d'apprentissage, c'est-à-dire de situations organisées délibérément pour permettre un apprentissage précis. Le concept de *contrat didactique* [Brousseau 86] a été forgé pour permettre l'étude de ces liens entre l'enseignant et l'élève qui déterminent, de façon le plus souvent implicite, les responsabilités et le rôle de chacun relativement à la connaissance, et qui sont susceptibles d'affecter le produit de l'apprentissage.

Ainsi, en mathématiques, si le professeur pose le problème de la démonstration d'une propriété, la vérité de cette propriété est peu susceptible d'être remise en question ; elle est garantie implicitement par la requête même du professeur. Ou encore, si le rapporteur est un instrument explicitement autorisé pour la résolution d'un problème de géométrie, alors l'élève pourra penser qu'il lui faut chercher une solution utilisant les angles ; mais son absence peut tout aussi bien prendre une signification : "les angles ça va pas marcher parce que t'avais pas prévu de rapporteur" ([Balacheff 88], p.358).

Tout acte de l'enseignant est susceptible de prendre une signification relativement à l'activité de l'élève et, partant, peut être générateur de "perturbations" de l'apprentissage. On peut se poser la question de savoir si l'enseignant est indispensable, si l'on ne pourrait l'écarter pour éviter ces effets perturbateurs. La réponse est négative, et c'est là une contradiction fonctionnelle des situations d'enseignement. En effet, parmi toutes les constructions intellectuelles qu'il a élaborées au cours de son activité, l'élève ne peut distinguer seul celles

qui doivent être retenues et conservées pour un réinvestissement futur. Celles qui n'ont pas seulement un caractère local, adapté à la situation courante, mais qui participent d'un savoir nouveau. "Le sujet banalise la question dont il connaît les réponses dans la mesure où il n'a pas les moyens de savoir si d'autres se la sont posée avant lui, ou si personne n'a su y répondre, ou encore si d'autres questions lui ressemblent ou lui sont liées par le fait qu'elles pourront recevoir une réponse grâce à celle-ci, etc. Il faut donc que quelqu'un d'extérieur vienne pointer ses activités et identifie celles qui ont un intérêt, un statut culturel" ([Brousseau 86], p.71).

Un autre "effet de bord" qui ne peut être évité est celui dû à la contextualisation des connaissances sans laquelle il ne peut y avoir d'enseignement. "Un contenu de savoir ayant été désigné comme savoir à enseigner subit dès lors un ensemble de transformations adaptatives qui vont le rendre apte à prendre place parmi les *objets d'enseignement*. Le «travail» qui d'un objet de savoir à enseigner fait un objet d'enseignement est appelé la *transposition didactique* " ([Chevallard 85] p.39). Cette transposition n'est pas réductible à une simplification qui réduirait la complexité d'une connaissance mais en préserverait le sens. A la fois par les liens qu'elle détermine avec les connaissances anciennes et par la mise en scène qu'elle requiert pour en rendre possible l'enseignement, elle atteint la connaissance dans sa signification même.

Prenons l'exemple, classique, de l'introduction des nombres décimaux à partir de la mesure et des changements d'unité. Dans cette approche, à l'école élémentaire et au collège, il s'impose de fait que la mesure d'une longueur peut toujours s'exprimer par un nombre entier si on choisit une unité assez petite, mais le nombre décimal introduit dans ce contexte pourra apparaître légitimement comme une complexification du nombre entier, non comme un nouveau nombre [Brousseau 83].

4. UNE PROBLEMATIQUE EPISTEMOLOGIQUE POUR L'EIAO

4.1. L'EIAO, comme réalisation de modèles didactiques

Un environnement EIAO, c'est-à-dire un environnement d'apprentissage informatisé utilisant les moyens de modélisation de l'intelligence artificielle, constitue de fait une réalisation d'un modèle didactique dans la mesure où il s'agit d'un environnement délibérément conçu pour permettre l'acquisition d'une connaissance spécifique. Il réalise un modèle, inscrit dans le dispositif matériel, de la connaissance à enseigner et des interactions nécessaires à son appropriation par l'apprenant. Les questions qui nous occupent ici concernent principalement la nature des conceptions construites par l'apprenant au cours de

ces interactions, d'une part, et d'autre part, la nature des relations entre ce qui est signifié par le modèle implanté, en tant que système de signifiants, et la connaissance de référence invoquée dans le processus de modélisation.

Nous prendrons, pour illustrer notre propos, le cas de CABRI-géomètre ([Baulac 90], [Laborde J.M. 86]) et de APLUSIX [Nicaud 87]. CABRI-géomètre est un micromonde de géométrie élémentaire qui permet la construction de figures géométriques et leur modification par manipulation directe en conservant les propriétés explicitement spécifiées lors de la construction. Ce micro-monde offre la possibilité de restituer l'histoire de la solution apportée par l'apprenant à un problème de construction, d'en donner une description dans un langage proche de la langue naturelle, d'évaluer la validité d'une conjecture et d'en donner une réfutation éventuelle sous la forme d'une configuration particulière. APLUSIX est un tutoriel dans le domaine de l'algèbre élémentaire, plus particulièrement la factorisation de polynômes, qui permet d'expliquer la résolution de problèmes en mode "apprentissage par l'exemple", ou d'apporter des aides en mode "apprentissage par l'action".

4.2. Questions liées à la modélisation de l'apprenant : modèle comportemental et modèle épistémique

La présentation classique de l'architecture d'un environnement d'apprentissage de type EIAO fait apparaître comme composantes essentielles : un modèle de l'apprenant, un modèle de l'expert du domaine, un module pédagogique et l'interface [Nicaud 88]. Le terme de modèle recouvre, en fait, des réalités très diverses selon les réalisations effectives que l'on considère. On pourrait formuler plus généralement que le calcul des interactions d'un système tutoriel intelligent avec l'apprenant s'appuie le plus souvent sur des principes pédagogiques généraux¹ et une interprétation des comportements de l'apprenant observés à l'interface du dispositif informatique, le caractère modulaire des représentations adoptées étant plus ou moins bien respecté.

Les difficultés rencontrées pour la prise en compte des connaissances de l'apprenant, tout particulièrement pour en constituer une modélisation, ont conduit à formuler des questions d'ordre épistémologique liées principalement au diagnostic. Wenger distingue, dans le diagnostic, le niveau comportemental et le niveau épistémique ([Wenger 87] pp.367-394). Cette distinction repose, respectivement, sur l'absence ou la présence *d'interprétation* des comportements. L'absence d'interprétation ne signifie pas, au sens de Wenger, que seuls sont pris en compte les observables à l'interface du système, mais que l'inférence de comportements non observés se limite à la reconstruction des actions au sens des opérations

¹ "tutoring", "coaching", "guided discovery learning", etc.

nécessaires à la résolution de problème sans chercher à en tirer un modèle de l'état des connaissances de l'apprenant (student's knowledge state). En revanche le diagnostic épistémique consiste en une interprétation des comportements, éventuellement reconstruits, de l'apprenant pour élaborer un modèle de ses connaissances. Cette problématique paraît lier le questionnement épistémologique uniquement au projet d'interprétation des comportements dans la mesure où ce serait à ce niveau que serait examinée la question de la nature des conceptions de l'apprenant, en particulier à propos de l'interprétation des erreurs.

La position exprimée par Wenger suppose clarifiée la question de savoir ce qu'est un comportement vu à travers le filtre de l'interface d'un système informatique. Les choses sont moins simples qu'il ne le paraît. Pour le montrer, nous proposons de distinguer d'une part l'univers des observables et de modélisation externe au système, d'autre part l'univers des observables et de modélisation interne au système (figure 1).

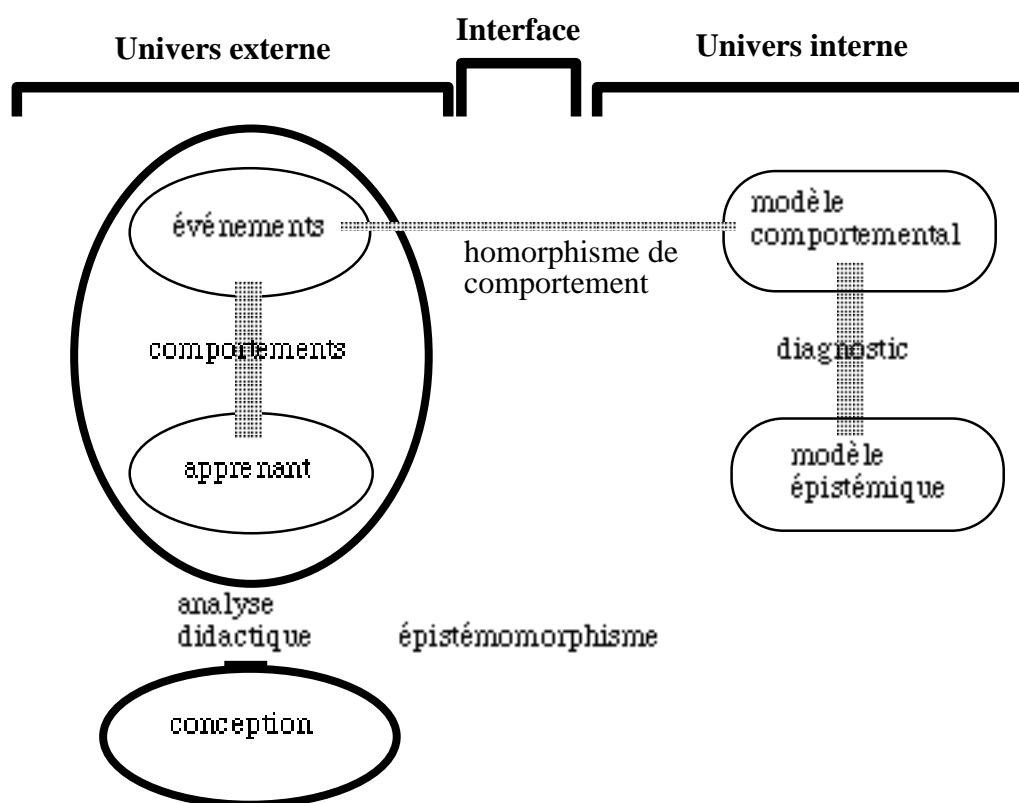


Figure 1

L'univers externe au système offre à l'analyse une réalité qui n'est pas directement organisée en observables. Les observables sont le résultat d'un découpage et d'une organisation du "réel" sous un contrôle théorique et méthodologique dont la pertinence est déterminée par la problématique de l'observateur¹. Ainsi le travail du didacticien comprend la constitution d'un corpus d'observables, parmi lesquels ceux appelés "comportements" de l'apprenant, à partir duquel est construit un modèle des connaissances de l'apprenant que nous appelons *conception*.

L'univers interne offre à l'analyse une réalité constituée de l'ensemble des événements, au sens informatique, saisis à l'interface du système. Cet ensemble est susceptible d'une description au sens de la physique² dont nous pensons acceptable de postuler qu'elle est exhaustive, mais pas plus que la réalité externe cet ensemble ne se constitue directement en observables pertinents qui seraient les arguments du calcul des interactions. Pour cela nous distinguons deux types de modélisation, et donc de modèles, jusqu'ici non distingués dans l'architecture des systèmes : le *modèle comportemental* et le *modèle épistémique*.

Le modèle comportemental est obtenu à partir de l'ensemble des événements par un traitement qui consiste soit à ignorer des événements qui ne seraient pas pertinents, soit à remplacer certaines séquences d'événements par un descripteur de plus haut niveau déterminé par le langage de commande du système. On obtient ainsi une description des observables dont on exige qu'elle permette de "rejouer" la session de l'apprenant de façon fidèle au regard de la problématique dans laquelle on se place. On peut être tenté d'affirmer qu'il n'y a pas d'interprétation mais seulement une transduction régulière. Mais comme pour le didacticien, cette transformation, que nous appellerons *homomorphisme de comportement*³, exige un découpage et une organisation de l'ensemble des événements. En particulier le traitement d'événements "continus", par exemple issus de la manipulation directe d'icônes à l'interface du système, pose un problème complexe de caractérisation, voire de discrétisation, pour pouvoir être utilisés dans le traitement didactique.

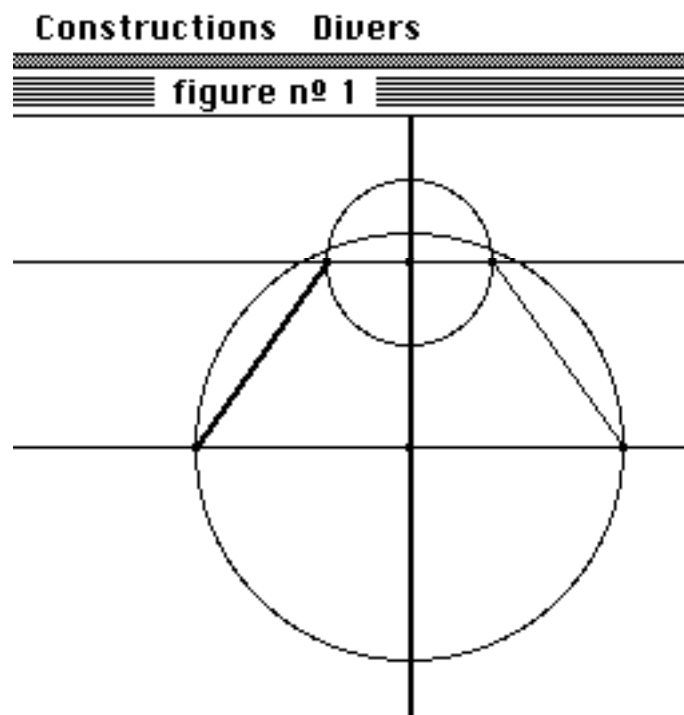
Dans le cas de CABRI-géomètre un modèle comportemental réduit est constitué par un graphe de nœuds (les objets de CABRI) et d'étoiles (les transformations de CABRI) qui rend

¹ "La nature s'offre à notre connaissance immédiate avec une richesse et une complexité extraordinaire [...] Au fond, il n'y a pas de «partie» dans la nature, de faits qui soient par eux-mêmes distincts des autres, car la réalité se présente à nous comme une masse confuse, et c'est nous qui, par notre activité mentale, découpons la nature en une multiplicité de faits artificiellement isolés les uns des autres, afin de répondre à nos besoins, à nos tendances, à notre volonté d'action, ou à notre désir de connaissance. En d'autres termes, nous *analysons* la nature [...] Pour observer des faits et les délimiter, il convient d'être sollicité par des idées directrices, telles que théories et principes préalables." ([Gex 47] pp.97-99).

² Pour autant que le problème de la distinction du bruit et du signal puisse être considéré comme résolu dans ce cas.

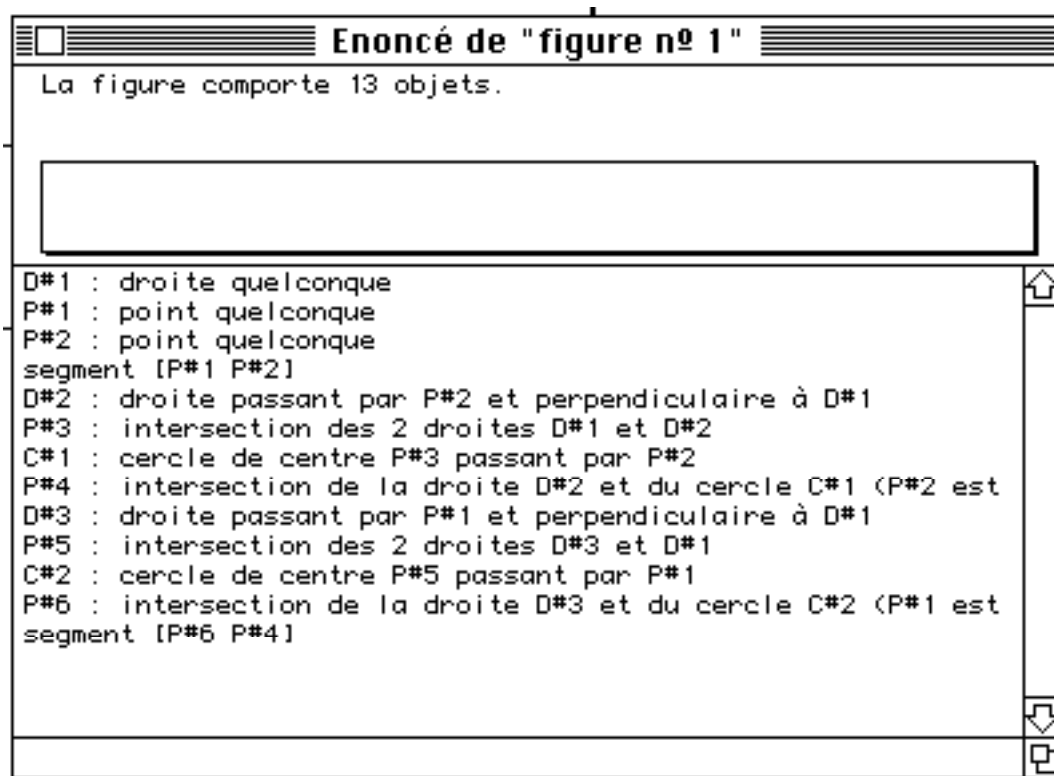
³ Ce que nous traduirons en anglais par *behavioral mapping*. Le terme "mapping" est employé pour désigner un processus de représentation de la connaissance qui respecterait des propriétés de structure, il s'agirait en quelque sorte d'une incarnation de la connaissance dans la matière (éventuellement symbolique) que constitue le dispositif informatique. Le terme homomorphisme veut rendre compte de cette idée.

compte de la structure logique de la solution proposée par un l'élève, au sens de la connaissance de référence implantée. La fonctionnalité *Enoncé* du logiciel en donne une description dans un langage proche de la langue naturelle. Les figures ci-dessous donnent une représentation de la solution d'un élève au problème de la construction du symétrique d'un segment donné par rapport à un axe donné (figure 2), son énoncé (c'est-à-dire sa description au sens de CABRI-géomètre, figure 3) et le modèle comportemental associé (figure 4). En annexe nous présentons une solution à ce problème dont l'analyse requiert le traitement d'un "événement continu". L'homomorphisme de comportement, défini par la version actuelle de CABRI-géomètre, ne retient que les événements susceptibles d'une signification géométrique. Si dans le cours de la résolution l'apprenant a demandé une aide (par exemple l'explication d'une primitive de construction), cette information n'est pas conservée.



Les éléments donnés du problème sont le segment
dont on cherche l'image et l'axe de symétrie (en traits épais sur le dessin)

Figure 2



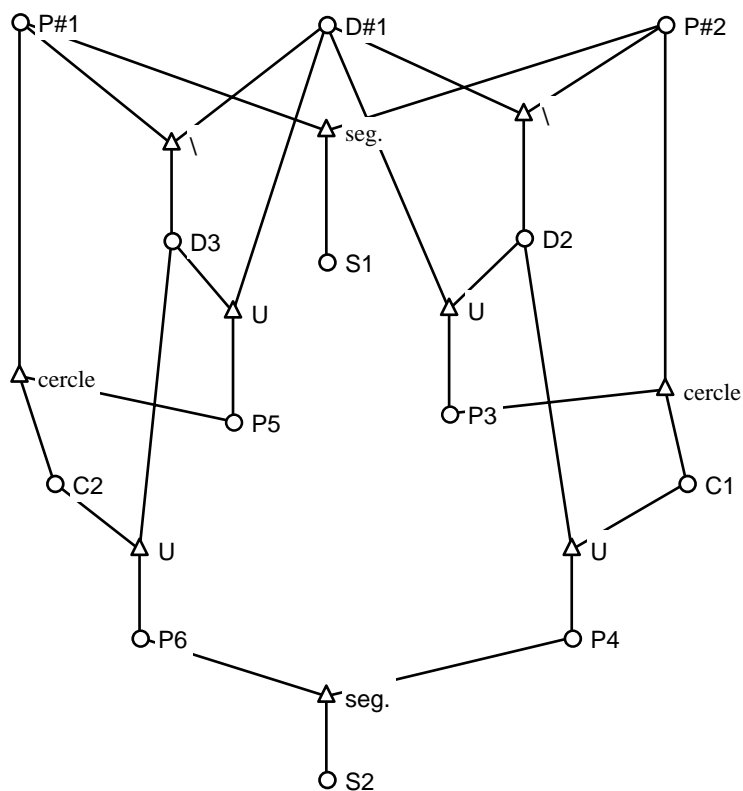
Description de la configuration construite (figure 2)
donnée par la fonctionnalité "énoncé" de CABRI-géomètre.

Figure 3

Le modèle épistémique est construit à partir du modèle comportemental. Il correspond en fait à ce que l'on entend en général par "modèle de l'apprenant" dans la littérature. Sa construction requiert un traitement du modèle comportemental qui n'est pas autre chose que le diagnostic, c'est-à-dire la reconstruction, à partir des observables, du processus de résolution de problèmes (ce mot est pris ici dans un sens très large), ou la caractérisation de l'état cognitif de l'apprenant. La fonction de diagnostic dépend de façon étroite des choix théoriques qui sont faits, au moment de sa spécification, sur la nature et le fonctionnement des connaissances de l'apprenant et sur les formes de l'apprentissage. Si on ne peut examiner directement la relation entre le modèle épistémique et l'état effectif des connaissances de l'apprenant, en revanche on peut examiner la relation qu'entretient ce modèle avec le modèle (conception) élaboré par le didacticien, sous la réserve de la validité de ce dernier. Nous dirons de cette relation qu'elle constitue un *épistémomorphisme*¹ si elle permet de mettre en évidence que le modèle épistémique rend compte des propriétés structurelles et conceptuelles décrites par le modèle de conception attribué à l'apprenant.

¹ En anglais, *epistemological mapping*.

Le logiciel DEBUGGY [VanLehn 82] est un bon exemple de construction d'un modèle épistémique dans le domaine de la mise en oeuvre d'un algorithme de soustraction en colonne de nombres entiers naturels. Le modèle comportemental est ici réduit au résultat de la soustraction. L'erreur est identifiée à l'écart entre le résultat de l'apprenant et le résultat correct calculé par le système. Elle est interprétée comme le symptôme d'une *procédure-clé*¹ dont disposerait l'apprenant, dont la mise en défaut par le problème courant conduit à un *bricolage* (repair) producteur du résultat erroné. La théorie cognitive sous-jacente (la "REPAIR theory", [Brown 80]) est que la procédure de l'apprenant est une version altérée d'une procédure correcte (procédure enseignée). La fonction de diagnostic consiste en la construction de la procédure-clé à partir d'une procédure de référence connue du système, puis en l'association d'une procédure de *bricolage* sous la réserve d'une procédure, dite *critique*, visant à satisfaire un principe de plausibilité psychologique. La validation du diagnostic consiste en la vérification de sa capacité à engendrer l'erreur observée. Brown et VanLehn posent explicitement le problème de la plausibilité psychologique de leur modèle, en revanche ils n'abordent pas celui de l'existence d'un épistémomorphisme entre leur modèle et des conceptions de la soustraction telles que le didacticien pourrait les spécifier.



Ce graphe montre la structure au sens de CABRI-géomètre

¹ Traduction libre de "Core -procedure".

de la construction réalisée (figure 2).
Il constitue une représentation du modèle comportemental.

figure 4

Le cadre d'analyse que nous proposons ici diffère par plusieurs aspects de celui proposé par Wenger : d'une part par la signification attribuée au terme comportement et, d'autre part, par le lieu de l'interrogation épistémologique et la problématique qui en découle. En effet, par comportement nous entendons ici une action déclenchée par l'apprenant à l'interface du système et identifiable sous la forme de signaux au sens physique (les événements) alors que Wenger entend par là les actions constitutives du processus de résolution de problème. C'est pour cette raison que cet auteur est amené à distinguer les comportements observables des comportements non observables¹ qu'il peut être nécessaire de reconstruire pour déclencher une interaction pertinente. Nous retrouvons, quant à nous, ce problème au niveau du calcul du modèle épistémique, mais avec une différence de taille : nous ne séparons pas connaissance et procédure². La distinction de Wenger, entre comportemental (behavior) et épistémique, conduirait dans notre approche à éventuellement reconnaître des types de modèles épistémiques différents par la nature des entités qui les constituent et leur structure. On pourrait rendre compte de cette distinction en parlant de modélisation procédurale et de modélisation conceptuelle. Quoiqu'il en soit, la construction de ces modèles, suggérée par VanLehn, nécessite une interprétation des comportements observés qui ne serait pas moindre parce qu'elle se limiterait à des descriptions procédurales. En particulier, s'il s'agit d'inférer des procédures non directement observables, on ne voit pas comment une telle inférence pourrait avoir lieu sans hypothèses fortes sur les connaissances de l'apprenant.

Un bon exemple, dans le contexte de CABRI-géomètre, est fourni par le cas décrit en annexe. La solution proposée par l'apprenant ne peut être comprise que si on analyse la construction qu'il propose de l'image d'un point comme la mise en oeuvre d'une procédure particulière qui ne correspond à aucun observable que les fonctionnalités du système, au sens de la géométrie, permettraient de décrire. La mise en évidence d'observables pertinents n'est ici possible que par une analyse de l'ensemble des événements avec le filtre d'une modélisation de la résolution de cette classe de problèmes dont dispose actuellement le didacticien et qu'il a construite par ailleurs.

Notre approche permet de distinguer des lieux et des formes de questionnement épistémologique :

¹ Opérations mentales de l'apprenant qui ne donnent pas lieu à la production d'événements à l'interface du système ([Wenger 87] p.368).

² Notons ici que Wenger dans une note de bas de page exprime un doute qu'il n'examine pas plus avant sur la possibilité d'une telle séparation : "the difference between unobservable behavior and knowledge can be subtle and may only make sense in the context of a communication environment" (ibid. p.368)

- (i) questions liées à la spécification de l'homomorphisme de comportement.

Le problème est celui de la capacité à simuler l'apprenant au sens de la re-production de la suite des observables pertinents au regard de la problématique dans laquelle on se place. "Pertinence" signifie ici que l'histoire ainsi reconstruite contient les matériaux suffisants pour calculer le modèle épistémique, c'est-à-dire pour caractériser la relation entre l'apprenant et la connaissance en jeu. C'est en cela que ce questionnement relève de l'épistémologie.

- (ii) questions liées à la fonction de diagnostic et au modèle épistémique qui en résulte. Le problème est celui de la description de la relation entre l'apprenant et la connaissance concernée en des termes pertinents et utilisables pour le calcul de l'interaction didactique. Ce questionnement est d'essence essentiellement épistémologique.

- (iii) questions portant sur la propriété d'épistémomorphisme de la relation entre le modèle épistémique et la conception attribués à l'apprenant.

Le problème de l'identification et du traitement de l'erreur peut recevoir ici une nouvelle formulation. Remarquons, d'abord, que l'erreur n'est pas un fait mais la lecture d'un fait qui comme tout autre observable doit pouvoir être découpé et reconnu dans le réel offert à l'observation. Elle n'existe pas en tant que telle au niveau du modèle comportemental, en revanche doivent pouvoir figurer à ce niveau les éléments, comportements ou absence identifiable de comportements, qui serviront d'arguments au diagnostic d'erreur et à son interprétation. Un premier problème est d'assurer que l'interface du système est perméable à des événements susceptibles d'être traduits dans le modèle comportemental selon des éléments auxquels pourra être fait le procès d'erreur. L'examen du problème de l'erreur au niveau du modèle comportemental fait apparaître une notion plus générale, celle d'*écart au comportement attendu*. Ainsi, en mode apprentissage par l'action, APLUSIX identifie et traite des écarts à une solution contrôlée par le système [Nicaud 89b]¹. Nous réservons le terme d'*erreur* à l'*interprétation* d'un ou plusieurs observables pour la construction du modèle épistémique. Pour reprendre une distinction évoquée plus haut, cette interprétation peut être essentiellement "procédurale", comme dans le cas de la reconstruction de règles erronées dans PIXIE [Sleeman 83], ou "conceptuelle" dans le cas de la tentative d'ELECTRE [Paliès 88] de construction d'un modèle conceptuel des connaissances de l'apprenant.

4.3. Questions liées à la représentation des connaissances : transposition informatique et contrat didactique

¹ C'est aussi le cas des tutoriels développés dans le cadre théorique ACT* (Adaptive Control of Thought [Anderson 83]) dont un principe d'interaction est de sanctionner tout écart de l'apprenant aux résolutions admises par le système, quelle que soit par ailleurs leur validité.

Une des pierres d'achoppement du développement d'un environnement d'apprentissage informatisé est la spécification des modèles de connaissances, leur formalisation et, finalement, leur représentation symbolique. Ce codage dans un système de signifiants qui est étranger à la connaissance sur laquelle il opère, a nécessairement des effets producteurs et des effets réducteurs. Le problème des effets réducteurs a été identifié, un paradigme de recherche particulièrement développé dans ce domaine est celui de l'explication dans les systèmes experts à des fins de formation [Vivet 87] ou de justification [Kassel 90]. Les limites de la représentation explicite de connaissances sous la forme de règles de production ont été bien mises en évidence : l'énoncé d'une règle ne suffit pas à rendre compte de sa signification ou de ses raisons. Les effets producteurs, en revanche, ne semblent pas avoir fait l'objet d'une problématisation particulière. On a pourtant pu mettre en évidence, dans des contextes "classiques" d'enseignement, que les représentations graphiques ou iconiques, que l'on retrouve comme moyen de communication à l'interface de nombreux systèmes, sont susceptibles d'induire des conceptions erronées très robustes [Arnaud 84].

Peut être faut-il voir là la vitalité d'une "illusion de la transparence" mise en évidence en mathématiques à propos du rapport entre la représentation graphique d'une fonction, tracé sur un support matériel, et son graphe, objet mathématique [Rogalski 84]. Ainsi, le problème de la relation du représenté à la représentation est posé en terme de *fidélité épistémique* ([Wenger 87] p.313) ou de *fidélité conceptuelle* (ibid. p.84). L'idée maîtresse de cette problématique est, dans le premier cas, la réduction de l'écart entre la réalisation physique d'une représentation à l'interface d'un système et l'expertise¹, éventuellement identifiée à sa modélisation interne au système (*fidélité épistémique relative*), ou, dans le second cas, la réduction de l'écart entre cette présentation et les représentations mentales de l'expert. Les recherches dans cette direction ont conduit à développer des interfaces matérialisant des concepts sans référents matériels directs, tels la vitesse, la force, l'énergie, pour en permettre la manipulation directe. Rechercher ainsi un mode d'accès direct aux concepts eux-mêmes revient à passer outre le problème fondamental de la relation entre signifiant et référent, rendu plus complexe ici par l'absence fréquente de référent matériel, et de la relation entre signifiant et signifié.

A notre sens, la recherche de modes d'accès à la connaissance libres de tout biais étant vaine, il serait plus fécond, un mode de modélisation et de représentation étant adopté, de

¹ Par l'adjectif "épistémique" Wenger fait référence à une connaissance en dehors de son rapport à un sujet connaissant. En quelque sorte une référence absolue, il pourra ainsi parler de "l'expertise" en soi, distinguée des modèles mentaux de l'expert auxquels il réfère par l'attribut "conceptuel". Il remarque : "Whether such an epistemic level really exists in some platonic sense is not the point here. The claim is, rather, that the distinction between the epistemic and the representational levels is useful in designing and evaluating models of communicable knowledge" ([Wenger 87] P.312).

poser le problème de la caractérisation de la relation qu'il détermine avec la connaissance concernée.

Le problème des effets réducteurs et producteurs est un aspect d'une problématique plus générale : les choix de modélisation et de représentation des connaissances peuvent affecter la connaissance dans sa nature même dans un processus analogue à celui de la transposition didactique. Ils sont par là susceptibles d'affecter de façon essentielle l'apprentissage, c'est-à-dire la reconstruction du sens par l'apprenant qui opère dans le contexte que ces choix déterminent. Je propose de parler de *transposition informatique* pour désigner ce processus d'adaptation de la connaissance pour la rendre "implantable" et manipulable dans un environnement d'apprentissage informatisé. En fait, ce travail sur la connaissance, et le problème de ses conséquences éventuelles, a déjà été identifié à propos de la spécification et du développement de systèmes experts pour la formation. Pour le développement de APLUSIX, Nicaud remarque que si de nombreux travaux existent en Intelligence artificielle concernant les manipulations algébriques, en fait "les logiciels qui ont été réalisés utilisent très souvent des méthodes éloignées du raisonnement humain, ce qui les rend inaptes à être utilisés pour l'enseignement des manipulations algébriques. Ainsi [de] puissants systèmes contiennent des connaissances mises en oeuvre de façon procédurales ; ils ne peuvent pas être l'expert d'un tuteur intelligent sur les manipulations algébriques [...] APLUSIX est un système expert qui a été conçu pour simuler le mieux possible le raisonnement humain pour une classe d'exercices d'algèbre" ([Nicaud 89a] pp.146-147). Le travail, entrepris par Nicaud, pour la modélisation de la manipulation des expressions algébriques élémentaires est déterminé par la fonction didactique du système, il est en cela de l'ordre de la transposition didactique sous les contraintes technologiques du système informatique.

Mais la problématique développée dans ce domaine pour les systèmes experts est restée jusqu'ici essentiellement technique en s'efforçant de trouver la meilleure transposition, alors que le phénomène en question est inhérent au projet d'inscription de la connaissance dans un dispositif matériel, et donc dans un cadre et avec des moyens qui lui sont a priori étrangers ; c'est-à-dire dont l'élaboration n'est pas constitutive de la connaissance elle-même.

Prenons l'exemple du concept de cercle dans les environnements LOGO et CABRI-géomètre. Ces deux micro-mondes permettent de représenter et manipuler des objets de la géométrie élémentaire plane, mais le concept de cercle est fondamentalement différent dans les deux cas. Pour LOGO le cercle est le résultat d'une procédure de tracé qui en fait un polygone régulier à "beaucoup de côtés", pour reprendre l'expression des élèves. C'est le contrôle perceptif à l'écran qui conduit à considérer l'objet tracé non plus comme un polygone régulier mais comme un cercle. Au mieux le cercle apparaît comme une courbe à courbure constante. Dans CABRI-géomètre un cercle est déterminé par son centre et un point de sa

circonférence. Un même problème, celui de la construction de trois cercles tangents deux à deux extérieurement, n'aura pas la même complexité dans les deux environnements.

Bien sûr, on ne manquera pas d'évoquer le recours à des représentations multiples, mais il n'y a pas d'évidence qu'il existe un recouvrement fini qui ne laisserait pas hors de portée un aspect significatif de la connaissance en question. Une autre voie consisterait à délimiter le *domaine de validité épistémologique* de la modélisation choisie. Ce domaine peut être caractérisé par l'ensemble des problèmes pour lesquels la modélisation adoptée donne les moyens d'une résolution, la nature des solutions possibles et de celles qui sont exclues, la nature des systèmes de signifiants choisis pour la représentation interne et à l'interface, et leurs implications potentielles sur les conceptions résultantes.

Les problèmes liés à la représentation des connaissances que nous avons évoqués ne couvrent qu'une partie de la problématique didactique dont relève l'EIAO. En effet, les logiciels d'EIAO réalisent des situations didactiques en ce qu'ils organisent l'interaction entre l'apprenant et un milieu constitué pour permettre un apprentissage déterminé. De la même façon que de telles interactions jouent un rôle déterminant dans l'élaboration des conceptions par l'apprenant dans les situations dites classiques, elles sont susceptibles d'affecter cette élaboration dans le contexte d'un environnement d'apprentissage informatisé. Les modalités d'interaction sont repérées, dans la littérature, par rapport à de grandes classes, telles que le dialogue socratique, la rétroaction immédiate ou la découverte guidée. Mais l'analyse des conséquences de ces choix sur la nature des conceptions de l'apprenant est rarement entreprise de façon rigoureuse, le plus souvent la validation des systèmes porte sur une appréciation globale des performances de quelques sujets (dont on note en général le progrès). Pourtant, par exemple, on sait bien que le dialogue socratique peut privilégier des comportements de l'apprenant qui relèvent plus de la découverte des intentions du tuteur, la réponse est devinée, que d'une construction spécifique des conceptions dont il dispose. L'EIAO n'a pas de raisons d'échapper, a priori, à la constatation ironique de Schoenfeld : "when good teaching leads to bad results" [Schoenfeld 86], à la suite d'une étude des conceptions développées par des élèves à la suite d'un "bon enseignement" en géométrie, montrant leurs conceptions erronées et leurs difficultés profondes alors que leurs performances leur valaient de bons résultats aux évaluations standards. Le concept de contrat didactique permet de problématiser ces phénomènes qui sont constitutifs de l'interaction sociale lorsqu'elle vise à provoquer intentionnellement un apprentissage.

Enfin, la communication élève-machine passe par l'appropriation et la maîtrise par l'élève d'un mode de communication symbolique spécifique qui peut affecter l'apprentissage. On peut à cet endroit se poser la question du rôle que peut jouer la représentation que l'élève a du fonctionnement du dispositif informatique dans sa construction d'une connaissance. Des

travaux portant sur l'apprentissage de la programmation ont mis en évidence le rôle essentiel joué par ces représentations dans l'acquisition des connaissances par les élèves (cf. par exemple [Pea 84], [Rogalski 88]).

5. CONCLUSIONS

Parce que ce qui est en question est l'acquisition de connaissances, l'EIAO ne peut s'en tenir aux problématiques et aux seuls modes de validation en usage en informatique. Elle détermine, par son projet scientifique et technologique, un champ de questions dont un trait unificateur est la dimension épistémologique. De ce point de vue ces recherches recourent largement celles engagées en didactique des disciplines. Comme nous l'avons montré, plusieurs des concepts développés, notamment pour la didactique des mathématiques, sont susceptibles de fournir des points de départ pour aborder les questions épistémologiques propres à l'EIAO. Les développements à venir montreront vraisemblablement que l'on ne peut se limiter à un simple transfert des outils théoriques et des méthodes de la didactique, l'EIAO présente des spécificités qui obligeront à des élaborations originales. En particulier, la didactique, ayant jusqu'ici un objet d'étude inscrit dans l'interaction sociale, n'a sûrement pas produit les moyens d'une étude des processus d'apprentissage liés à une interaction artificielle pour laquelle l'interaction sociale ne peut constituer qu'une métaphore fortement anthropomorphique et par plusieurs aspects erronée [Self 89].

Enfin, en soulignant une nécessaire problématisation épistémologique de l'EIAO, nous pensons apporter des éléments pour montrer que ce champ de recherche ne constitue pas seulement un domaine d'application de l'Intelligence Artificielle, mais bien l'un des paradigmes importants de ce domaine. En effet, nous montrons que la validité des environnements d'apprentissage informatisé ne peut être assurée qu'au prix d'un examen critique des modélisations et représentations des diverses connaissances qu'ils recouvrent, et donc de leur capacité à permettre un tel examen. En d'autres termes, les systèmes d'EIAO doivent pouvoir s'expliquer et pas seulement fonctionner. Par cette exigence épistémologique les recherches fondamentales originales qu'ils suscitent sont une contribution importante au développement de l'intelligence artificielle [Kodratoff 86].

6. RÉFÉRENCES

[Anderson 83] Anderson J.R. (1983) *The architecture of cognition*. Cambridge, MA : Harvard University.

- [Arnaud 84] Arnaud P. *Schémas et représentations en chimie dans leurs rapports à la didactique*. In : Giordan A., & Martinand J.L. (Eds.) Actes des sixièmes journées internationales sur l'éducation scientifique. Chamonix : Centre Jean Franco. pp.107-116.
- [Balacheff 88] Balacheff N. (1988) *Une étude des processus de preuve en mathématiques chez des élèves de collège*. Thèse de doctorat ès sciences. Grenoble : Université Joseph Fourier.
- [Baulac 90] Baulac Y. (1990) *Un micro-monde de géométrie, CABRI-géomètre*. Thèse. Grenoble : Université Joseph Fourier.
- [Bourdieu 80] Bourdieu P. (1980) *Le sens pratique*. Paris : Editions de Minuit
- [Brousseau 83] Brousseau G. (1983) *Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques*. Recherches en didactique des mathématiques. 7 (2) pp.164-198.
- [Brousseau 86] Brousseau G. (1986) *Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques*. Recherches en didactique des mathématiques. 7 (2) pp.33-115.
- [Brown 80] Brown, J. S., & Van Lehn K. (1980) *Repair Theory: a generative theory of bugs in procedural skills*. Cognitive Science. 4 pp.379-426.
- [Chevallard 85] Chevallard Y. (1985) *La transposition didactique*. Grenoble : La Pensée Sauvage.
- [Clancey 83] Clancey W.J. (1983) *The epistemology of a rule based expert system : A framework for explanation*. Artificial Intelligence. Vol.20 pp.215-251.
- [Gex 47] Gex M. (1947) *Eléments de philosophie des sciences* (titre original : Méthodologie). Neuchâtel : Le Griffon 1(964)
- [Grenier 88] Grenier D. (1988) *Construction et étude du fonctionnement d'un processus d'enseignement sur la symétrie orthogonale en sixième*. Thèse. Grenoble : Université Joseph Fourier.
- [Inhelder 85] Inhelder B., & Caprona D (1985) *Constructivisme et création de nouveauté*. Archives de psychologie. 53 (204) pp.7-18.
- [Johsua 87] Johsua S., & Dupin J.J. (1987) *La gestion des contradictions dans des processus de modélisations physiques en situation de classe*. Actes du colloque "Didactique et acquisition des connaissances scientifiques". Grenoble : La Pensée Sauvage (1988) pp. 185-199.
- [Kassel 90] Kassel G. (1990) *Systèmes experts de deuxième génération et explication du raisonnement*. Revue d'intelligence artificielle 4 (2) pp.89-99.
- [Kodratoff 86] Kodratoff Y. (1986) *Is AI a sub-field of computer science ? or, AI is the science of explanations*. Rapport de recherche n°312. Laboratoire LRI. Orsay : Université de Paris XI.

- [Kuhn 70] Kuhn T.S. (1970) *Les structures des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion (1983).
- [Laborde J.M. 86] Laborde J.M. (1986) *Proposition d'un CABRI-géomètre, incluant la notion de figures déformables*. Sujet d'année spéciale. Grenoble : ENSIMAG.
- [Laborde J.M. 89] Laborde J.M. & Trilling L. (1989) *Conception et réalisation d'un système intelligent d'apprentissage de la géométrie*. Présentation de projet IMAG. Grenoble : Institut IMAG-CNRS.
- [Nicaud 87] Nicaud J.F. (1987) *APLUSIX : un système expert en résolution pédagogique d'exercices d'algèbre*. Thèse. Orsay : Université de Paris XI.
- [Nicaud 88] Nicaud J.F., & Vivet M. (1988) Les tuteurs intelligents : réalisation et tendances de recherches. *Technique et science informatiques* 7 (1) pp.22-45.
- [Nicaud 89a] Nicaud J.F. (1989) *APLUSIX : un système expert pédagogique et un environnement d'apprentissage dans le domaine du raisonnement algébrique*. *Technique et Science Informatique* 8(2) pp.145-155.
- [Nicaud 89b] Nicaud J.F., Aubertin C., Nguyen Xuan A., Saïdi M., & Wach P. (1989) *APLUSIX : un environnement d'apprentissage à plusieurs niveaux dans le domaine du raisonnement algébrique*. Actes des premières Journées EIAO de Cachan. Cachan : Ecole Normale Supérieure.
- [Paliès 88] Paliès O. (1988) *Méta-connaissances pour la modélisation de l'élève. Contribution au diagnostic cognitif par système expert*. Thèse. Paris : Université de Paris VI.
- [Pea 84] Pea R.D. (1984) *Language-independent conceptual "bugs" in novice programming*. *Journal of Educational Computing*. Special issue on "Novice Programming". pp.1-12.
- [Piaget 75] Piaget J. (1975) L'équilibration des structures cognitives. *Etudes d'épistémologie cognitive* Vol. XXXIII. Paris : PUF.
- [Rogalski 84] Rogalski J. (1984) *Représentations graphiques dans l'enseignement : concepts et méthodes d'analyses appliquées aux graphes de fonctions*. In : Giordan A., & Martinand J.L. (Eds.) Actes des sixièmes journées internationales sur l'éducation scientifique. Chamonix : Centre Jean Franco. pp.379-388.
- [Rogalski 88] Rogalski J. (1988) *Les représentations mentales du dispositif informatique dans l'alphabétisation*. Actes du "Premier colloque Franco-allemand de didactique des mathématiques et de l'informatique" (C. Laborde, Ed.). Grenoble : La Pensée Sauvage. pp.235-245.
- [Schoenfeld 86] Schoenfeld, A. H.: 1986, 'When good teaching leads to bad results: the disaster of well taught mathematics courses', in P. L. Peterson and T. L. Carpenter (eds.), The study of students' thinking during instruction in mathematics.

- [Self 89] Self J. (1989) *The case for formalising students models (and intelligent tutoring systems generally)*. Proceedings of the 4th International Conference on AI and Education. Amsterdam, May 1989.
- [Sleeman 83] Sleeman D.H. (1983) *Infering student models for intelligent computer-aided instruction*. In : Michalski R.S., Carbonell J.G., & Mitchell T.M. (Eds.) *Machine Learning : an artificial intelligence approach*. Palo Alto : Morgan Kaufmann.
- [Van Lehn 82] Van Lehn K. (1982) *Bugs are not enough: empirical studies of bugs, impasses and repairs in procedural skills*. Journal of Mathematical Behaviors. Vol. 3 pp. 3-72.
- [Vergnaud 81] Vergnaud G. (1981) Quelques orientations théoriques et méthodologiques des recherches françaises en didactique des mathématiques. *Recherches en didactique des mathématiques* , II (2) pp. 215-232.
- [Vergnaud 84] Vergnaud G. (1984) *Interaction sujet-situations*. Actes de la III^e Ecole d'Eté de Didactique des Mathématiques. Grenoble : IMAG. pp.22-42.
- [Vivet 87] Vivet M. (1987) *Système expert pour enseigner : méta-connaissances et explications*. Congrès international MARI/COGNITIVA. Paris.
- [Wenger 87] Wenger E. (1987) *Artificial Intelligence and Tutoring Systems*. Los Altos : Morgan Kaufmann Pub. Inc.

ANNEXE

Le cas que nous considérons ici n'est pas fictif, les informations que nous avons sur cette résolution sont extraites des observations réalisées par Franck Bellemain (laboratoire LSD2, recherches en cours) à propos de la résolution de problèmes de symétrie orthogonale. Le problème posé est celui de la construction du symétrique d'un segment relativement à une droite (éléments en gras sur la figure 5) ; la position "verticale" de l'axe de symétrie, pour cette tâche, est délibérée, elle correspond à l'une des variables dont le rôle est étudié.

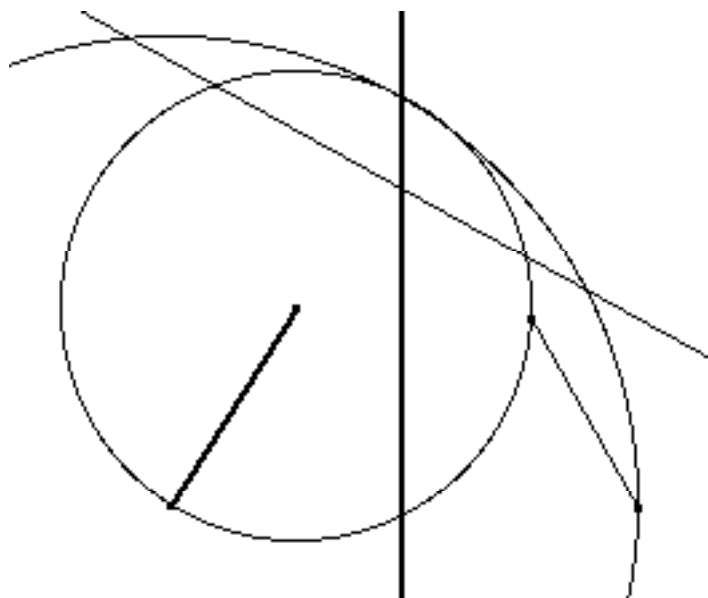


Figure 5

La solution proposée (figure 5) est le résultat d'actions de l'apprenant à l'interface de CABRI-géomètre dont l' "énoncé" (figure 6) donne une représentation. Le modèle comportemental de cette solution (figure 7) est élaboré en ne retenant de l'ensemble des événements que ce qui est identifiable à des primitives de l'interface du logiciel. On peut caractériser la transformation correspondante par une grammaire dont les règles seraient du type (e représente le mot vide) :

[déplacement du curseur "flèche"] ---> e

[clic de la souris] [déclat de la souris sur l'item "Cercle" dans le menu "Création"]

[déplacement du curseur "crayon"] [clic de la souris] [déplacement du curseur "main"] [décllic de la souris] ---> [Cercle quelconque C#n]

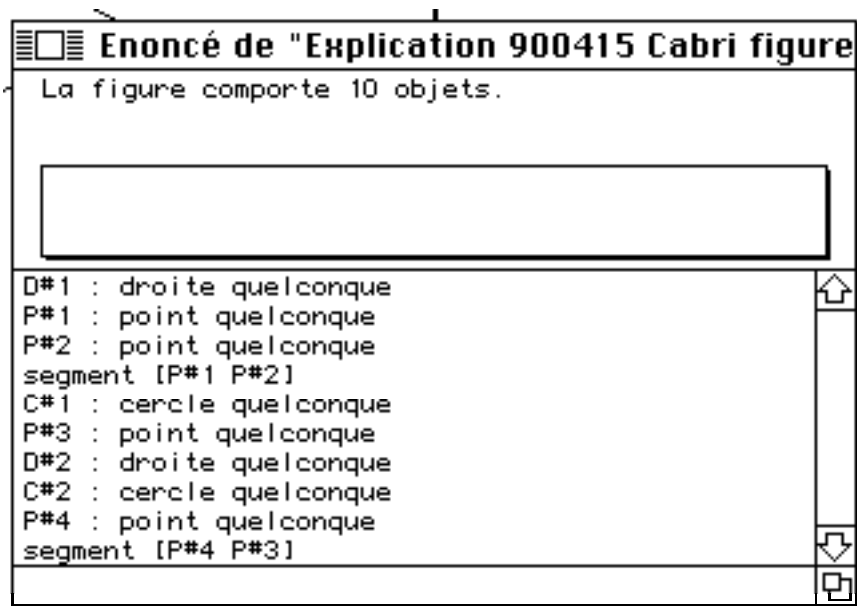


Figure 6

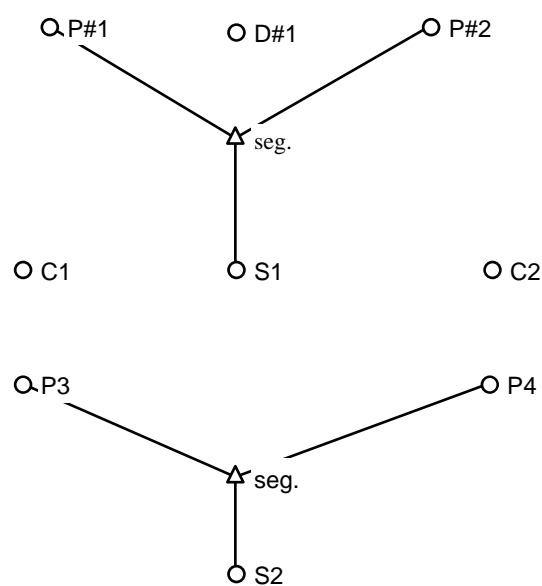


Figure 7

On peut constater sur le graphe de représentation du modèle comportemental (figure 7) des relations absentes. Ce graphe est non connexe. En fait, si ce modèle était rejoué, il n'y a aucune raison pour que la configuration obtenue corresponde à ce que cet élève avait l'intention de construire : tous les éléments de la figure sont indépendants au sens de CABRI-géomètre. L'observation du didacticien montre clairement d'une part que les caractéristiques effectives des cercles C1 et C2 sont précisément liées à la position relative des extrémités du segment donné et de l'axe de symétrie, d'autre part que les points P3 et P4 ne sont pas quelconques mais placés respectivement à l'intersection de parallèles (non représentées) au bord horizontal de l'écran et des cercles C1 et C2. Cette procédure est stable pour cet élève. En fait, les cercles ont été construits par une déformation continue d'un cercle de base du centre vers sa périphérie (fonctionnalité de l'item "cercle" du menu "création"¹) en cherchant à vérifier perceptivement que l'axe de symétrie passera par le milieu du rayon. Dans la version actuelle, cet événement continu n'est pas analysé par CABRI-géomètre qui ne retient comme action de l'élève que la sélection d'un item particulier du menu. On constate sur cet exemple qu'une telle analyse requiert à la fois des outils informatiques et des outils didactiques pour une caractérisation pertinente du signal.

¹ CABRI-géomètre dispose par ailleurs dans le même menu d'un item "cercle défini par deux points" qui permet de construire un cercle en désignant son centre et un point de sa circonférence.