

ELISABETH DELOZANNE

Interaction explicative, une étude de cas

Publications de l'Institut de recherche mathématiques de Rennes, 1994-1995, fascicule 3
« Fascicule de didactique des mathématiques et de l'E.I.A.O. », , exp. n° 3, p. 1-29

http://www.numdam.org/item?id=PSMIR_1994-1995__3_A3_0

© Département de mathématiques et informatique, université de Rennes,
1994-1995, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la série « Publications mathématiques et informatiques de Rennes » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

INTERACTION EXPLICATIVE, UNE ETUDE DE CAS ¹

Elisabeth Delozanne ²

Laboratoire d'Informatique de l'Université du Maine

BP 535, 72017 LE MANS CEDEX

e-mail : delozanne@lium.univ-lemans.fr

tél.: (33) 43 83 33 76, télécopie : (33) 43 83 35 65

1. Introduction

Le projet ELISE a pour objectif la conception d'un logiciel à *base de connaissances* qui permette à des étudiants de l'enseignement scientifique d'acquérir des *savoir-faire* sur le *calcul des primitives*, par la *résolution de problèmes* et les *explications*.

Ce projet se situe à l'intersection de trois courants de recherche :

- les recherches en EIAO, et plus précisément les recherches sur les *systèmes à base de connaissances pour faciliter l'apprentissage des mathématiques*,
- les recherches en Intelligence Artificielle sur les *systèmes experts explicatifs* (SEE),
- et enfin, les recherches portant sur *l'apprentissage et sur la résolution de problèmes de mathématiques* en psychologie cognitive et en didactique.

Ces trois courants entretiennent des liens étroits, mais les problématiques sont quelque peu différentes, même si certains axes de recherche se recoupent, au moins partiellement. Dans le paragraphe qui suit, nous situons globalement notre travail par rapport aux résultats et aux problèmes des recherches sur les systèmes experts explicatifs. Ensuite nous définissons la méthodologie de conception que nous avons adoptée pour le projet ELISE. Puis nous présentons l'interaction explicative mise au point et testée auprès des utilisateurs et nous analysons les résultats de ces tests en précisant comment intégrer les résultats concernant les explications dans les spécifications du système à construire et en les comparant aux résultats obtenus par d'autres chercheurs.

¹ Cet article est une version révisée d'un article publié aux Deuxièmes journées explication du PRC-IA, Sophia-Antipolis, Juin 1992

² Maître de conférences à l'Université du Maine

2. Problématiques des explications dans les SEE

Les recherches en Intelligence Artificielle sur les systèmes experts explicatifs se sont d'abord attachées à développer les capacités explicatives des systèmes experts. Les travaux sur MYCIN, GUIDON et NEOMYCIN [CLANCEY 1983, 1987] qui servent encore de référence ont établi que, pour expliquer (a fortiori enseigner) une expertise, il faut davantage de connaissances que pour résoudre des problèmes dans ce domaine d'expertise. L'ajout d'un module d'explication à un système expert existant est un travail quasi impossible si la tâche d'explication (a fortiori d'enseignement) n'a pas été prise en compte dès la phase de conception du résolveur de problèmes [BOURY et al 1990b], [JIMENEZ 1990]. La qualité, la variété et l'organisation des connaissances représentées sont tout à fait cruciales pour un système dont l'objectif est de s'expliquer (a fortiori d'enseigner).

Ainsi, pour construire un système expert explicatif, la *principale difficulté rencontrée concerne l'explicitation et la représentation des connaissances à expliquer.*

Depuis quelques années une préoccupation nouvelle retient l'attention des chercheurs : les utilisateurs, en particulier industriels, n'utilisent pas (ou utilisent très peu) les fonctionnalités explicatives des systèmes à base de connaissances. On peut envisager plusieurs raisons à ce comportement :

- les ordinateurs n'ont pas la réputation d'être conviviaux, et les utilisateurs ne demandent pas ce qu'ils ne pensent pas trouver,
- l'interaction avec une machine est dirigée vers des commandes plus que vers des explications,
- les explications présentées par les logiciels ne sont pas suffisamment pertinentes par rapport aux attentes de l'utilisateur.

Trois pistes de recherche (plus ou moins complémentaires selon les chercheurs) tentent de prendre en compte cette préoccupation de la pertinence des explications présentées par un système expert :

- construire un modèle de l'utilisateur qui permette au système d'adapter ses explications aux connaissances de l'utilisateur (voir par exemple, [BALACHEFF 1990c]) ;
- mettre au point des interactions qui permettent à l'utilisateur d'obtenir les explications dont il a besoin ou de les négocier avec le système [O'MALLEY 1987], [CHEVALLIER 1992] ; cette démarche est souvent présentée comme alternative au modèle d'utilisateur [BREZILLON 1991], [GILBERT 1988] ;
- mener des enquêtes et recueillir des corpus pour cerner les besoins des utilisateurs [GILBERT 1988], [O'MALLEY 1987], [WOGNUM 1990], [DIENG et GIBOIN 1991].

Le travail que nous présentons ici se situe dans cette problématique de l'*usage des explications* et concerne deux thèmes principaux.

Le thème principal est celui de l'*interaction explicative*. L'explication n'est pas conçue dans ELISE comme une réponse ponctuelle à des questions "Comment ?", "Pourquoi ?" ou "Pourquoi pas ?". C'est l'ensemble des interactions entre le logiciel et l'utilisateur qui définit un processus explicatif. Ce processus est structuré par ce que nous avons appelé des "situations d'interaction". Ces situations sont définies par une partie statique descriptive et une partie dynamique (et prédictive). La partie statique comporte les objectifs, la tâche à réaliser, les outils disponibles et les stratégies que l'utilisateur est censé mettre en œuvre pour effectuer la tâche. La partie dynamique présente les différents scénarios d'interaction sur la situation (et en particulier des messages explicatifs liés à ces scénarios). *Les explications sont ainsi liées aux objectifs respectifs de l'utilisateur et du système, et à la tâche objet de l'interaction.*

Le deuxième thème concerne la *méthodologie de conception de systèmes explicatifs*. La problématique des usages nous a conduits à adopter une démarche itérative de conception s'appuyant sur la réalisation de maquettes et de tests auprès des utilisateurs. L'objectif est ainsi d'une part d'organiser la collaboration interdisciplinaire indispensable à la conception des situations d'interaction et, d'autre part, de mener l'analyse des besoins et l'intégrer aux spécifications du système explicatif à construire.

Ainsi, les relations logiciel-utilisateur final et concepteur-responsables du contexte d'utilisation du logiciel sont centrales dans notre méthodologie de conception.

Dans les systèmes experts explicatifs (et en EIAO), l'adaptation à l'utilisateur a souvent été envisagée par le biais d'une modélisation de ses connaissances. Nous formulons l'hypothèse que cette démarche de conception, qui s'appuie sur une collaboration étroite avec les utilisateurs et sur une prise en compte de leur besoins dans la conception même du système, est peut-être un moyen de s'adapter à l'utilisateur en "contournant l'insoluble problème de sa modélisation" pour paraphraser J. Self [SELF 1988] .

Dans les paragraphes qui suivent, nous précisons, pour le projet ELISE, la méthodologie de conception adoptée et présentons les situations d'interactions mises au point et testées. Enfin nous abordons les leçons que nous tirons des tests en ce qui concerne les explications.

3. Méthodologie de conception

La nécessité d'un travail pluridisciplinaire en Intelligence Artificielle, en EIAO et sur les explications n'est plus à démontrer (voir par exemple [BARON 1982], [LE MOIGNE 1986], [EIAO 1989, 1991], [EXPLICATIONS 1991]). Cette collaboration que la communauté de chercheurs appelle de ses vœux n'est pas toujours aisée à mettre en œuvre. De notre point de vue, elle impose une démarche itérative de conception. La figure 1 représente les différentes étapes de cette démarche.

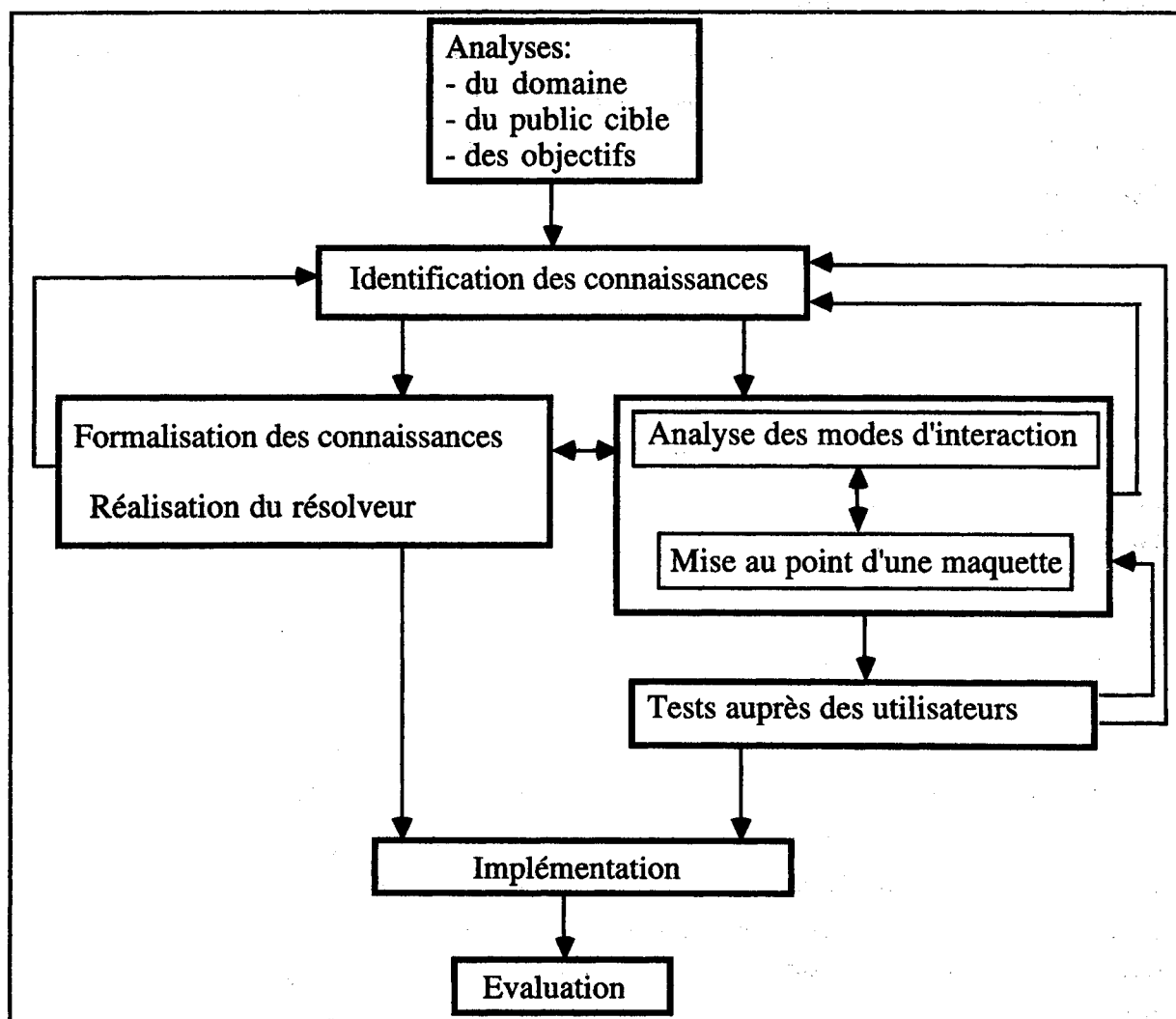


figure 1 : Démarche de conception d'ELISE

Les responsables de l'organisation du contexte d'utilisation d'un logiciel d'EIAO sont les didacticiens de la discipline concernée et les enseignants. Pour le projet ELISE, nous avons envisagé ainsi une collaboration tripartite : chercheur en Intelligence Artificielle, didacticien, enseignants du domaine¹.

¹ Les participant directs au projet ELISE sont :

- Elisabeth Carrière qui travaille sur la base de connaissances et le résolveur de problèmes;

Dans le paragraphe suivant, nous proposons, à titre d'exemple, les modalités de collaboration que nous avons adoptées, en précisant, à chaque étape de la démarche de conception, le rôle de chaque discipline et en insistant sur les résultats concernant la base de connaissances et les explications.

La collaboration s'est organisée autour de quatre axes :

- un système à base de connaissances résolvant les problèmes sur le domaine, CAMELIA qui a servi de premier prototype au projet,
- un cours polycopié qui expose aux étudiants une méthode de résolution de problèmes du domaine,
- des maquettes simulant le comportement du logiciel à construire pour mettre au point les interactions et expliciter les connaissances nécessaires,
- des séances de tests auprès des utilisateurs.

3.1. Les explications dans CAMELIA

CAMELIA [VIVET 1984] est un résolveur de problèmes de calcul algébrique conçu pour établir des preuves et conduire des calculs symboliques en faisant appel à des algorithmes et à des heuristiques. Des outils d'explications ont été développés ([VIVET et al 1988], [CARRIERE et al 1990]) pour permettre à CAMELIA de répondre à certaines questions de l'élève lorsque la résolution est terminée. Ces outils fonctionnent en deux temps.

Le premier temps consiste à filtrer l'arbre de résolution en utilisant trois critères :

- le type de l'explication : *exposer la solution* (présenter la branche succès), *commenter la résolution* (présenter le brouillon, c'est-à-dire la démarche de recherche, y compris les tentatives infructueuses), et *justifier* (expliciter les raisons des choix effectués) ;
- le degré de détail souhaité : pas à pas, ou les grandes étapes ;
- les thèmes à détailler ou à ne pas détailler.

Le deuxième temps consiste à traduire l'arbre compacté en langage "clair" pour l'élève.

-
- Elisabeth Delozanne qui a conçu et réalisé les maquettes et les outils correspondants, organisé les séances de tests auprès des usagers et le dépouillement des résultats, proposé une analyse de ces résultats qui a ensuite été discutée par l'équipe, et enfin précisé les spécifications du système à partir de cette analyse remaniée;
 - Marc Rogalski qui a fourni l'analyse du domaine et a dirigé ce travail du point de vue de la didactique des mathématiques;
 - Martial Vivet qui a conçu et réalisé CAMELIA et dirigé ce travail de recherche du point de vue Intelligence Artificielle.

```

CALCUL DE prim (x * cos x) dx
ESSAI DE : INTEGRATION DE U*U'          ECHEC

APPLICATION DE : Produit d'un monôme et d'une fonction log, expo ou trigo
x est un monôme en x
cos x est une fonction trigonométrique de x
CALCUL DE intégrer-par-parties (x* cos x) dx
APPLICATION DE : PRIM UV' = UV - PRIM U'V
1- poser u = x et calculer sa dérivée u' la dérivée de x est 1
2- poser v'= cos x et calculer sa primitive prim (cos x) dx = sin x
3- chercher la primitive de u'v prim (sin x) dx = - cos x
4- uv -prim uv' = (cos x) + x*(sin x)
RESULTAT
intégrer-par-parties (x*cos x) dx = (cos x) + x*(sin x)

RESULTAT
prim x*(cos x) dx = (cos x)+ x*(sin x)

```

figure 2 : Exemple de résolution commentée par CAMELIA (recopie d'écran)

Dans CAMELIA, le raisonnement explicatif repose donc d'une part, sur les connaissances du système dans le domaine (trace de résolution et base de connaissance), et, d'autre part, sur des informations concernant l'élève et la session fournies au système explicateur par un futur module pédagogique.

Les limites de cette démarche sont de deux natures différentes [CARRIERE et al 1990] :

- la première concerne la représentation des connaissances du domaine pour obtenir un système expert explicatif,
- la deuxième concerne l'usage des explications dans un logiciel d'enseignement.

La première de ces limitations est un problème bien étudié par les chercheurs en Intelligence Artificielle qui travaillent sur les systèmes experts explicatifs. Il s'agit d'explicitier les connaissances qui permettent qu'un système expert "raisonne sur son raisonnement" [KASSEL 1986] et en particulier les connaissances qui permettent d'évoquer les connaissances, de choisir les démarches appropriées et de justifier ces choix.

La deuxième se rapporte à la pertinence des explications dans l'apprentissage par la résolution de problèmes en général et dans l'interaction avec un logiciel d'EIAO en particulier.

Ce travail nous a conduit à aborder deux axes de recherches :

- 1) déterminer avec des didacticiens enseignants du domaine les connaissances de référence à expliquer et à prendre en compte la tâche d'explication dès la phase d'acquisition des connaissances,
- 2) définir avec eux des scénarios d'interaction assurant la pertinence des explications par rapport à l'apprentissage visé.

3.2. L'enseignement de méthodes de résolution

Nous disposons d'une base de collaboration exceptionnelle par le biais d'un *cours polycopié* qui expose à un public étudiant, une méthode pour rechercher des primitives. Cette méthode, mise au point par Marc Rogalski [ROGALSKI 1988], est enseignée depuis quelques années à des étudiants de première année de l'enseignement universitaire scientifique (DEUG A). Elle s'inspire en partie d'une méthode utilisée par Schoenfeld [SCHOENFELD 1985].

La méthode repose sur trois *stratégies* :

- la *simplification* qui repose sur un classement des outils et regroupe un certain nombre d'actions à tenter dans certaines situations,
- le *classement* qui repose sur un classement des problèmes et regroupe des problèmes types et des plans de résolution associés,
- la *réurrence* ou l'identification polynomiale qui sont *deux stratégies complémentaires* et proposent des techniques spécifiques pour certaines classes de problèmes.

Chaque stratégie donne lieu à plusieurs *tactiques*.

Par exemple : simplifier les fonctions composées, démarche associée à une classe de fonctions sont des tactiques respectivement attachées à la stratégie de simplification et à la stratégie de classement.

"Ces tactiques s'appuient sur trois *techniques* principales qu'il faut absolument dominer : intégration par parties, changement de variable, décomposition d'une fraction rationnelle en éléments simples.

Enfin, il est essentiel de *savoir par coeur* les primitives d'un certain nombre de fonctions usuelles" [ROGALSKI 1988].

Par exemple :

- simplifier les fonctions composées, ou bien linéariser les puissances des fonctions $\sin x$, $\cos x$, $\operatorname{sh} x$, $\operatorname{ch} x$ sont des *tactiques* de la *stratégie de simplification* ;
- dans la *stratégie de classification*, à la classe de problèmes (tactique) "Fractions rationnelles en $\sin$, $\cos$, tg ", est associée une démarche de résolution (changement de variable $t = \operatorname{tg} x/2$) et un objectif (pour se ramener à une fraction rationnelle). La tactique précise que, sur certains cas particuliers, on peut utiliser des changements de variable qui donnent lieu à des calculs plus simples.

Cette méthode nous intéresse, nous concepteurs de logiciel d'EIAO, à plusieurs titres :

- pour la *construction d'un résolveur plus proche du raisonnement humain* : la méthode contient en particulier de nombreuses informations qui permettent de

rendre opérationnelles les connaissances exposées dans les manuels : "on part de ... et on imagine..." (démarche), "on joue sur le fait que ..." (justification d'une démarche), "cela n'a d'intérêt que si..." (contrôle), "on doit être embêté par... et en être conscient" (finalisation des actions) "on reconnaît" (évoque). Ces informations reposent sur des connaissances sur les objets mathématiques manipulés et permettent d'évoquer les outils et de les évaluer sans passer par des évaluations numériques difficilement explicables.

- pour la *construction d'une base de connaissances plus explicative* :

- le domaine est structuré par la méthode,
- la méthode exprime les connaissances stratégiques propres au domaine.

Ces deux points, ainsi que les points mentionnés ci-dessus, sont essentiels pour les explications dans les systèmes experts (par exemple: [BOURY et al 1990], [DIENG 190XX], [JIMENEZ XXX]).

- pour la mise au point de l'interaction entre le logiciel et les étudiants : la méthode est l'objet de l'interaction,

- les fonctionnalités du logiciel doivent inciter les étudiants à mettre en œuvre la méthode,
- les interventions du système visent à donner des leçons de méthode,
- les objectifs d'enseignement sont définis par rapport à l'enseignement explicite de méthodes [ROGALSKI 1990].

A partir de ce polycopié et du travail sur CAMELIA, nous avons élaboré une base de connaissances (papier) qui correspond à l'étape d'identification des connaissances à enseigner de la figure 1. Cette organisation, présentée dans [DELOZANNE et CARRIERE 1990] et dans [DELOZANNE 1992 p. 97], comprend quatre niveaux :

- les connaissances de base (niveau 1),
- les connaissances opératoires, c'est-à-dire les connaissances techniques de la méthode (niveau 2),
- les connaissances stratégiques propres au domaine, c'est-à-dire les tactiques de la méthode (niveau 3),
- les connaissances générales de contrôle de la résolution (niveau 4).

Les outils d'explications mis au point pour CAMELIA permettent alors d'envisager la formulation de trois types d'explications (exposer, commenter, justifier) à partir d'un arbre de résolution, de cette base de connaissances "suffisamment " riche (contenant les connaissances de méthode) et de paramètres sur le type de message souhaité.

3.3. La réalisation de maquettes

La construction de *maquettes successives*, simulant le fonctionnement d'ELISE à partir des spécifications obtenues à l'étape précédente permet de définir des situations d'interaction pour atteindre les objectifs d'enseignement déterminés avec les didacticiens..

3.3.1. Rôle dans la collaboration interdisciplinaire

Le rôle de ces maquettes est très important dans la collaboration interdisciplinaire. Elles aident à une meilleure compréhension entre les informaticiennes et les didacticiens en concrétisant les différents points de vue, et en leur permettant d'évoluer. Les informaticiennes proposent des maquettes, les didacticiens les font fonctionner, les étudient, les discutent, proposent des idées.

Les didacticiens dans la démarche d'"ingénierie didactique" [ARTIGUE 1990] définissent des scénarios d'enseignement et, à partir de ces scénarios, définissent des hypothèses sur le fonctionnement des élèves et justifient ces hypothèses. Ils sont habitués à spécifier des situations, mais pas de façon aussi détaillée que ne l'exige un cahier des charges informatique. Les maquettes les aident à "se soumettre à la discipline d'une modélisation calculable" pour employer une expression de Nicolas Balacheff [BALACHEFF 1991].

De plus, les travaux en didactique se sont à l'heure actuelle, peu intéressés à l'explication. Personne ne sait définir en général comment un élève acquiert une connaissance et encore moins quelle explication il faut donner pour faciliter cette acquisition. La construction de maquettes est ainsi un moyen "d'élucider" les connaissances des didacticiens en matière d'interaction explicative.

Enfin, l'utilisation pédagogique de l'informatique étant encore embryonnaire, les didacticiens ne disposent ni de la théorie ni de l'expérience pour définir des scénarios d'interaction avec un logiciel. C'est donc au concepteur informaticien de proposer de tels scénarios sur une maquette. En la faisant fonctionner, les didacticiens savent alors très bien dire ce qui leur semble intéressant et pourquoi, et ce qui leur semble mauvais et pourquoi. A partir de ces observations, nous pouvons, nous informaticien(ne)s, reprendre la maquette pour introduire de nouvelles fonctionnalités, de nouvelles situations ou simplement modifier et mettre au point la maquette précédente.

De notre point de vue d'informaticien(ne)s (ou de cogniticien(ne)s), *la construction de maquettes est un moyen d'acquérir des connaissances auprès de ces experts.*

3.3.2. Rôle dans la définition du processus explicatif

La mise au point des situations d'interaction a donné lieu à trois versions successives de la maquette.

Notre préoccupation initiale en tant qu'informaticien chercheur en Intelligence Artificielle, était (en schématisant beaucoup) : "quelles explications faut-il *montrer* aux étudiants ?" et celle des didacticiens "quelle est l'activité de l'étudiant ?". Ainsi, la première maquette que nous leur avons soumise a été jugée "trop bavarde" :

- les interventions du logiciel donnaient trop de détails, tant au niveau des calculs que des coups de pouce et des commentaires,
- les étudiants étaient trop incités à regarder, pas assez à agir.

On peut résumer leur point de vue en quatre slogans pour mettre au point les interactions :

- donnez aux étudiants l'occasion d'agir,
- incitez-les à anticiper, à se poser des questions,
- ne donnez pas trop de détails,
- ne résolvez pas le problème à la place des étudiants.

Pour reprendre la terminologie d'E. Cauzinille [CAUZINILLE 1990], ces situations doivent mettre en œuvre une *stratégie d'appropriation* par l'apprenant des connaissances à expliquer. Il faudra ensuite adopter une stratégie de présentation de ces connaissances, le principe retenu étant de *susciter un questionnement* chez les étudiants plutôt que de *leur montrer des explications*.

3.3.3. Réalisation informatique des maquettes

Nous avons retenu HyperCard pour construire les maquettes.

En effet HyperCard est d'abord un outil de prototypage rapide. Son langage de programmation HyperTalk est interprété ce qui permet de voir immédiatement l'effet du code que l'on écrit. Son orientation objet permet des modifications locales rapides, ce qui est très important étant donné le rôle que nous accordons aux maquettes dans la collaboration avec les didacticiens. Celles-ci doivent pouvoir être modifiées et évoluer rapidement. HyperCard tourne sur des micro-ordinateurs que l'on peut trouver à la disposition des étudiants, ce qui est un critère très important étant donné la méthodologie adoptée.

La maquette HYPER-ELISE qui a été testée est un logiciel qui peut assurer une heure d'enseignement. Elle n'est pas cependant un logiciel commercialisable, mais un outil de collaboration interdisciplinaire dont l'objectif est de spécifier et tester des situations

d'interaction. C'est un outil de recherche, pas un produit fini. Sa réalisation technique garde ainsi nécessairement des souvenirs des allers et retours entre les propositions des informaticiens et les remarques des didacticiens.

Le résultat de cette étape est la mise au point des trois situations d'interaction qui sont présentées au paragraphe 4.

3.4. L'organisation de tests auprès des utilisateurs

L'interaction entre un système informatique et un utilisateur est encore un domaine de recherche. En l'absence de théorie, les séances de tests auprès des utilisateurs sont une nécessité dans la phase d'étude et de mise au point d'un logiciel [COUTAZ 1991], [DIENG 1990], [PAQUETTE 1991], [DE LA PASSARDIERE 1989]. En ce qui concerne ELISE, ces séances ont pour but d'analyser les scénarios d'utilisation du logiciel pour mettre au point les aides et les explications de corriger les défauts flagrants, de pointer les distorsions, de regarder celles qui invalident les hypothèses émises lors de la définition des situations d'interaction, de proposer des modifications dans les situations, d'étudier les paramétrages à prévoir.

Il s'agit donc d'une étude qualitative de l'interaction, pas d'études statistiques sur l'influence du logiciel sur les performances des utilisateurs. L'objectif de recherche est d'évaluer la pertinence des situations proposées et de les mettre au point. Ces tests peuvent être considérés comme une évaluation formative du logiciel et non comme une évaluation finale d'un produit.

Nous avons mis au point des séances de tests des interactions par des étudiants travaillant sur une maquette, puis analysé les résultats suivant différents éclairages. Les enseignants sont un des éléments du système didactique, ils ont donc un rôle déterminant dans l'utilisation du logiciel dans un réel contexte d'enseignement. Il était donc impératif de tester les interactions auprès d'eux également.

3.4.1. Tests auprès des utilisateurs finaux

Il nous a semblé important de tester le logiciel auprès des étudiants *dans un réel contexte d'enseignement, avec un enjeu pour les étudiants*, et non pas sur des étudiants pris au hasard parmi nos connaissances ou répondant à une petite annonce (Cf. [CHI et al 1989], [BIECLACZYK et RECKER 1991]). En effet, même dans une utilisation libre-service, l'utilisation d'un logiciel dépend étroitement du contexte d'utilisation :

- présence ou non d'un enseignant, de compagnon,
- l'étude que l'étudiant a faite au préalable (cours magistral, polycopié, séances de travaux dirigés...),

- sa motivation (entraînement, révision en vue d'un contrôle...).

L'expérimentation a été prévue, pendant les horaires usuels d'enseignement, sur deux groupes de 15 étudiants dans des universités différentes (pour varier les contextes d'utilisation).

Pour réaliser ces tests, nous avons retenus plusieurs capteurs d'informations.

a) mémorisation des actions des étudiants à l'interface

La maquette contient un "*mouchard*" qui garde la trace des actions des étudiants sur le logiciel. Cette trace permet de rejouer les sessions et donne des indications sur le temps passé entre deux actions. En analysant ces traces, on obtient donc les *scénarios d'utilisation du logiciel* par les différents groupes. L'analyse des traces est faite en partie automatiquement (élagage et reformulation en français -enfin presque-, calcul des temps passés sur chaque situation).

Par contre, les intentions des étudiants sont parfois difficiles ou impossibles à déterminer ou même à deviner en étudiant la seule trace. En particulier, on constate par moments en étudiant la trace, que les étudiants ont eu une difficulté, mais on ne comprend pas toujours laquelle. C'est un problème bien connu de toutes les personnes qui essaient de comprendre le comportement de l'utilisateur ([PY 1990], [BALACHEFF 1991]). D'autres sources d'informations sont donc nécessaires.

b) questionnaire

Un *questionnaire* rempli par les étudiants en fin de séance contenait des questions ouvertes et fermées. Ce questionnaire comporte deux parties :

- la première concerne l'utilisation du logiciel ; les questions portent sur l'ergonomie, le contenu mathématique, la comparaison avec d'autres moyens d'enseignement (livre d'exercices, séance de travaux dirigés, leçon particulière), les points forts et point faibles du logiciel,
- la deuxième partie demande à l'étudiant des renseignements plus personnels concernant l'enseignement préalable sur le domaine, son degré de familiarisation avec l'informatique.

Les questionnaires sont un moyen d'obtenir des informations sur l'avis général des utilisateurs concernant le logiciel et son utilisation. C'est un moyen économique (ils sont faciles et rapides à dépouiller) pour établir des comparaisons entre les groupes, en particulier par l'intermédiaire des réponses aux questions fermées. Les questions ouvertes apportent des informations plus précises mais les réponses sont parfois lapidaires et difficiles à interpréter.

c) enregistrement audio

Les étudiants étaient placés *par groupe de deux* afin de pouvoir *enregistrer leurs réactions verbales sur cassette audio* ¹. Au niveau du décryptage des cassettes, nous avons rencontré une difficulté² : souvent, on ne peut pas distinguer les voix des intervenants. Nous ne pouvons donc mettre en évidence les tours de parole, et, dans l'analyse des corpus, nous considérons les deux étudiants comme un binôme. Cet inconvénient pourrait être évité en enregistrant un groupe mixte.

Ces enregistrements donnent une idée plus précise sur les réactions des étudiants aux explications et aux différents types d'interaction (et même au questionnaire). *Ils permettent de mieux comprendre les parcours des étudiants, les raisons de leurs hésitations et même leur façon d'utiliser le logiciel*. Nous regrettons a posteriori de ne pas en avoir enregistré davantage, spécialement pour l'étude de l'impact des explications. Ceci aurait cependant posé d'autres problèmes : décrypter une cassette et analyser les enregistrements sont des activités extrêmement coûteuses en temps.

d) post-test

Un post-test sur des exercices comparables a permis d'évaluer le niveau des étudiants et d'étudier leurs difficultés éventuelles. Ces post-tests ne sont pas conçus pour discerner l'influence du travail avec la maquette sur les performances des étudiants. Rappelons que les tests ont pour objectif la conception du logiciel, pas son évaluation.

e) observateurs

Des observateurs ont assisté aux séances. On sait que le rôle des observateurs peut être déterminant sur le résultats des tests. Dans les expérimentations que nous avons menées, leur rôle a varié selon le contrat passé avec les étudiants.

Dans l'une des séances, les étudiants savaient qu'ils testaient un logiciel. Ils ont beaucoup exploré, voire débogué le logiciel, ils ont fréquemment appelé les expérimentateurs pour donner leur avis ou signaler des coquilles, ou même pour émettre des conseils, et se sont montrés prolixes sur le questionnaire. Par contre seulement deux groupes (sur 8) ont utilisé le logiciel pour réellement résoudre les exercices. *Conformément au contrat qui s'était établi, ils ont testé le logiciel, mais il n'y a pas eu réellement dévolution des problèmes de calcul de primitives*.

¹Par ailleurs, le travail par groupe de deux, ce fonctionnement, habituel dans les séances de travaux pratiques, paraît être un facteur de discussion, de confrontation des savoirs et donc favorise l'apprentissage.

² Cette difficulté est également mentionnée par Isabelle Tenaud [TENAUD 1991]

Dans l'autre séance, les étudiants pensaient participer à une séance habituelle sur ordinateur de travaux pratiques de mathématiques. Les étudiants ont peu exploré, n'ont posé que peu de questions (uniquement sur le fonctionnement du logiciel) mais ont donné l'impression de vouloir résoudre les exercices et de vouloir apprendre à partir de leur résolution. *Conformément au contrat, ils ont fait une séance ordinaire de travaux pratiques de mathématiques.*

L'analyse que nous retenons s'appuie surtout sur les résultats de ce dernier groupe.

f) grilles d'analyse

Deux grilles d'analyse ont été adoptées pour étudier les résultats :

- une grille longitudinale qui consiste à suivre chacun des groupes d'étudiants,
- et une grille transversale qui consiste à comparer les différents groupes

Pour chacune des deux grilles, les informations provenant de l'analyse du mouchard (M) sont complétées par des informations provenant de l'enregistrement audio (K7), du questionnaire (Q), de l'observation (O) ou du post-test (T).

3.4.2. Tests auprès des responsables du contexte d'utilisation

Nous avons diffusé la maquette auprès d'une vingtaine d'enseignants du premier cycle universitaire, en joignant un document présentant le projet, un mode d'emploi et d'installation de la maquette ainsi qu'un questionnaire voisin de celui adressé aux étudiants

Nous avons obtenu huit réponses. Une des réponses contient un "journal de bord" qui a été rédigé spontanément et donne des indications précieuses sur les difficultés rencontrées et les réactions de cette enseignante-diadacticienne aux explications affichées.

3.5. Répartition des rôles

Le dépouillement des résultats des tests a été effectué par les informaticien(ne)s qui en ont proposée une analyse. Cette analyse a été ensuite discutée et reprise avec les didacticiens.

Pour résumer, dans cette collaboration interdisciplinaire, le rôle des didacticiens consiste à fournir l'analyse cognitive du domaine, les objectifs d'enseignement et un questionnement sur la pertinence des situations proposées, conçues et réalisées par les informaticien(ne)s.

4. Interaction explicative

Tout enseignant a pu constater que bien souvent, "montrer" une explication aussi bonne soit-elle, à un élève qui la "reçoit", ne suffit pas pour "transmettre" une connaissance à cet élève. Cette conception de l'apprentissage sur un modèle transmission-réception est considérée comme assez souvent inefficace par les chercheurs en didactique et en sciences de l'éducation qui lui préfèrent une conception où les activités de l'apprenant sont déterminantes.

Pour construire un logiciel qui enseigne à partir d'explications, il faut répondre à des questions portant sur le rôle des explications dans l'apprentissage :

- Quelle est l'activité de l'élève quand le système expose, commente ou justifie ses propres résolutions ?
- Pour l'élève, regarder une solution détaillée, regarder un système chercher, regarder une justification, est-ce source d'apprentissage ?
- Un logiciel qui résout les exercices à la place des étudiants est-il beaucoup plus utile qu'un livre d'exercices corrigés ?

Cette réflexion, menée avec des enseignants et didacticiens, nous a conduits à estimer qu'en EIAO, les explications ne sont pertinentes pour l'apprentissage que :

- si elles sont conçues en fonction d'objectifs d'enseignement déterminés,
- et si elles interviennent dans le cadre de scénarios d'interaction précis mis au point pour faciliter l'apprentissage.

4.1. Analyses préalables

Les analyses préalables portent sur le domaine à enseigner, le public cible, les difficultés rencontrées par les étudiants dans l'apprentissage du domaine. Ces analyses conduisent à définir les connaissances à enseigner, les connaissances prérequis, les objectifs d'enseignement, et enfin les exercices sur lesquels les étudiants vont travailler. Elles sont exposées en détail dans [DELOZANNE 1992].

En résumé, ELISE est *un outil s'insérant dans un dispositif d'enseignement*. Etant donné les objectifs (entraîner à la méthode), et les caractéristiques du public cible (qui dispose de bonnes connaissances techniques), nous avons retenu les options suivantes :

- ELISE est un environnement d'apprentissage où les étudiants, *par groupe de deux ont une assez grande autonomie de travail et l'initiative de l'interaction* ; ce n'est pas un tuteur qui décide de ce que l'étudiant doit faire ou ne pas faire, mais un outil aux mains des étudiants ; *le logiciel offre des fonctionnalités aux étudiants qui choisissent de les utiliser ou de ne pas les utiliser*;
- son utilisation est associée à tout un contexte d'enseignement ; pour s'assurer des prérequis nécessaires, il doit être utilisé après un cours, après avoir travaillé en TD pour acquérir les habiletés techniques, et après avoir étudié un minimum le

polycopié ; ce n'est donc pas un kit d'autoformation, mais *un outil complémentaire qui apporte un plus par rapport à l'enseignement usuel*;

- une part du travail avec le logiciel se fait oralement avec le co-apprenant et une autre partie sur papier sans aucun contrôle du système;
- sur les exercices, les *étudiants ont la charge du contrôle de la résolution* et le *logiciel celui des calculs* ; le mode de communication avec le logiciel consiste pour les étudiants à faire des *choix dans des menus*; le logiciel lui affiche du texte en langue naturelle, du texte mathématique, des graphiques et des menus. Les modes de communication sont donc dissymétriques.

4.2. Les situations d'interactions

Pour s'assurer de la pertinence des explications pour l'apprentissage, nous les insérant dans des situations d'interaction qui structurent les interactions entre le logiciel et l'apprenant et leur assurent une cohérence par rapport aux objectifs d'enseignement.

Nous avons distingué trois situations d'interaction : résolution en mode plan, résolution en mode pas-à-pas, et une vue générale sur les solutions "raisonnables" (c'est-à-dire qui correspondent à des tactiques de la méthode). Les deux premières situations *proposent des modes de résolution* de l'exercice ; la troisième *propose un bilan* sur l'exercice.

Plusieurs scénarios d'utilisation peuvent être envisagés et ont été utilisés par les étudiants pendant les séances de tests. Par exemple:

- 1) proposer un plan,
- 2) le vérifier pas-à-pas (en cas d'échec),
- 3) étudier la vue générale sur les solutions
- 4) étudier les commentaires sur les tactiques envisageables (ou les corrigés types).

4.2.1. Le mode Plan

a) présentation

Les *objectifs* sont d'inciter les étudiants à anticiper, à mettre en œuvre la méthode. La *tâche* proposée aux étudiants est d'établir un plan de résolution, c'est-à-dire de donner la liste des grandes étapes de la résolution. Dans le langage proposé un plan est une séquence de techniques.

Problème : Calculer $F(x) = \int (x^2 - 3x + 7) e^{-2x} dx$

Indiquez la première technique de votre plan

- ☐ Intégration par parties
- ☐ Changement de Variable
- ☐ Linéarité de l'intégrale
- ☐ Transformation
- ☐ Equation
- ☐ Identification
- ☐ Résultat Connu

Fin

Annuler le choix précédent

Notre plan:

STOP

Sommaire

?

1ère page

figure 3 : Résolution en mode plan

Pour effectuer la tâche les étudiants peuvent employer les stratégies suivantes (prédiction) :

- mettre en œuvre une des tactiques de la méthode, anticiper et traduire la tactique dans le langage ELISE,
- résoudre l'exercice sur papier et résumer leur résolution dans le langage proposé. Il est à remarquer qu'ici la combinatoire est généralement trop importante pour envisager une stratégie essais-erreurs.

Les *actions des étudiants* consistent à choisir les techniques dans l'ordre où elles doivent être appliquées pour résoudre l'exercice ; bien sûr les choix peuvent être corrigés. Ils peuvent également demander de l'aide (aide logicielle ou mathématiques).

L'aide mathématique (ou "*coups de pouce*") est conçue pour répondre à la question "comment démarrer?". L'objectif n'est pas de donner la solution, le bon choix, mais d'amener l'étudiant à un questionnement. HYPER-ELISE propose quatre types de coups de pouce. Ce sont les réponses (spécifiques au problème), à quatre questions générales que l'on peut se poser pour démarrer un problème :

- 1) quelles sont les caractéristiques du problème ?
- 2) la méthode est elle applicable ?
- 3) quelles sont les techniques applicables ?
- 4) à quel problème connu cela fait-il penser ?

Les *réactions* du système consistent :

- à proposer, en cas de demande, une aide mathématique,

- à chaque choix de l'étudiant, le système affiche le numéro de l'étape et le nom de la technique choisie dans le tableau intitulé : votre plan,
- quand l'étudiant a indiqué qu'il a terminé, le système évalue le choix de l'étudiant,
- édite un commentaire sur la tactique envisagée.

Problème : Calculer $F(x) = \int (x^2 - 3x + 7) e^{-2x} dx$

En effet, c'est un bon plan.

On applique 2 Intégrations par parties successives pour
- faire disparaître le polynôme par dérivation
- se ramener au résultat connu:
 $\int e^{-2x} dx$

Votre plan:

1) Intégration par parties
2) Intégration par parties
3) Résultat Connu

STOP

Sommaire

?

1

11ère page

figure 4 : exemple de commentaires associés à un bon plan

b) observations

Pendant les séances de tests, cette situation a été bien acceptée par les étudiants qui ont une maîtrise suffisante des techniques, et rejetée ou inutilisée par les étudiants dont le niveau est insuffisant. Elle a été utilisée soit pour anticiper en appliquant la méthode, soit pour résumer une résolution papier. Elle suscite un questionnement chez les étudiants qui l'ont utilisée. Elle semble donc intéressante par rapport aux objectifs d'enseignement.

Cette situation offre un mode de résolution inhabituel en papier crayon. Elle modifie le contrat habituel de résolution (trouver le résultat) et met l'accent sur la méthode de recherche. On peut ainsi espérer qu'elle modifie les représentations des étudiants sur le calcul de primitives.

Les coups de pouce n'ont jamais été utilisés, soit parce que les étudiants n'ont pas repéré cette fonctionnalité, soit qu'ils n'ont pas ressenti la nécessité de l'utiliser. En effet le type d'interaction permet de mettre en œuvre facilement une stratégie essais-erreurs. Si, en fonction des objectifs d'enseignement, on estime intéressant que les étudiants consultent les coups de pouce, il faut les inciter à les demander (en cas d'erreurs répétés par exemple).

Les difficultés rencontrées concernent le vocabulaire et l'expression des plans (Cf. [DELOZANNE 1992] pour une analyse détaillée).

Les améliorations à apporter portent sur trois points:

- accepter des plans partiels,
- favoriser les allers-retours entre le mode de résolution pas-à-pas et le mode plan,
- proposer des coups de pouce méthodiques en cas d'erreur.

c) spécifications pour ELISE

La situation de *résolution en mode plan* nécessite des connaissances complexes et peu fréquemment représentées dans les systèmes experts,

- capacités de résolution :

- pouvoir anticiper sur la forme du résultat en utilisant des connaissances sur les outils et sur les objets manipulés ; ceci demande de disposer des connaissances techniques (les outils, niveau 2) mais aussi de connaissances stratégiques liées au domaine (sur la façon d'utiliser ces outils, niveau 3); ces connaissances de méthode (associées à des tactiques de simplification et de classification) peuvent être codées par des schémas comportant des plans de résolution associées à des patterns de problèmes (type plans de CAMELIA) et des informations sur l'objectif visé et sur l'effet de la tactique,
- pouvoir choisir entre les tactiques applicables en disposant de critères de choix explicites (et proches des critères humains),

- capacités d'explication :

- pouvoir synthétiser un raisonnement pour n'en retenir que les étapes importantes (synthétiser),
- pouvoir évaluer le choix d'une tactique (commenter),
- pouvoir présenter les raisons qui guident cette évaluation (traits caractéristiques de la classe de problèmes),
- pouvoir donner la raison ou le principe de la démarche associée à la tactique ("on joue sur le fait que..."),
- pouvoir donner des indices qui permettent aux humains de penser au(x) bon(s) choix et au système de les évoquer (coup de pouce).

4.2.2. Le mode Pas-à-pas

a) présentation

Les *objectifs* de cette situation sont d'inciter à des choix raisonnés et de donner une correction de l'exercice. La *tâche à accomplir* est de choisir la technique applicable au problème courant, c'est-à-dire de déterminer le prochain pas de résolution.

Pour effectuer la tâche les étudiants peuvent utiliser les stratégies suivantes (prédiction) :

- mettre en œuvre une des tactiques de la méthode, anticiper et traduire la tactique dans le langage ELISE (raisonnement global) ;
- tester un plan refusé par le système pour obtenir des commentaires sur chacune des étapes (rôle de correcteur du logiciel) ;
- penser à une technique (vérification de ses conditions d'application) et vouloir l'appliquer (voir ce que ça donne) ; ici le raisonnement peut-être local ;
- penser à une technique et vouloir un commentaire du système sur leur choix (évaluation de son intérêt, ou confirmation de l'évaluation de l'étudiant) ;
- poursuivre l'application d'une tactique qu'ils ont commencé à mettre en œuvre à une étape précédente (raisonnement global) ;
- résoudre l'exercice sur papier et vérifier leur résolution dans le langage proposé (éventuellement vérifier leurs calculs, rôle de correcteur) ;
- essayer au hasard (pour tester le système, par incompetence ou indifférence).

Les *actions des étudiants* consistent à choisir la technique retenue, ou, éventuellement à demander de l'aide (coup de pouce ou aide logicielle). Les *réactions du système* sont :

- le système propose un coup de pouce en cas de demande d'aide mathématique (ce sont les mêmes types de coups de pouce que pour le mode plan),
- le système évalue la réponse des étudiants,
- le système édite un commentaire (éventuellement),
- le système applique le choix (s'il est applicable) :
 - . passe à l'étape suivante,
 - . ou demande un choix complémentaire.

b) observations

C'est le mode de résolution qui a été le plus utilisé. Il est apprécié des étudiants pour son rôle de correcteur et car il est proche du papier crayon avec le gros avantage que le logiciel fait les calculs. Il permet ainsi d'étudier de nombreuses tactiques en peu de temps. On constate que dans l'utilisation qui en a été faite, le choix raisonné l'emporte de loin sur l'essai erreur.

Comme pour le mode plan, on constate qu'il n'y a eu aucune demande de coup de pouce. De même, on ne constate aucune demande de commentaires sur le choix. On peut essayer d'avancer plusieurs raisons qui expliquent ce peu d'intérêt pour les commentaires; la principale raison nous semble de l'ordre de l'interaction. L'enjeu de la situation pour l'étudiant est de trouver la (ou une) solution. Si la solution mène à un résultat, elle est justifiée. En d'autres termes, c'est le succès d'une démarche qui la justifie. *Demander une*

justification d'un autre niveau (liée à la méthode, c'est-à-dire se rapportant à un classement des fonctions ou des outils) est une exigence qui n'est pas du tout naturelle et constitue un changement dans le contrat habituel de résolution.

Les améliorations à apporter concernent uniquement l'interaction:

- favoriser les allers-retours entre le mode de résolution pas-à-pas et le mode plan,
- proposer des coups de pouce méthodiques en cas de mauvais choix,
- annoncer explicitement les objectifs d'ELISE sur le premier écran et sur le mode d'emploi : entraîner à la méthode, aux choix raisonnés, à anticiper,
- faire formuler les commentaires par les étudiants, les commentaires du système ayant alors un rôle de correcteur ou de base de discussion.

c) spécifications pour ELISE

La situation de *résolution pas-à-pas* repose sur les capacités de résolution et d'explication "classiques" dans les recherches sur les systèmes experts explicatifs,

- *capacités de résolution* :

- pouvoir appliquer un outil à un problème courant pour le transformer en un (ou des) problèmes équivalents,
- pouvoir choisir parmi les outils applicables en disposant de critères de choix explicites (et proches des critères humains),

- *capacités d'explication* :

- pouvoir présenter une étape de la solution (exposer),
- pouvoir évaluer le choix de chacun des outils (commenter),
- pouvoir présenter les raisons qui guident cette évaluation (justifier, question "pourquoi ?" et "pourquoi pas ?"),
- pouvoir donner des indices qui permettent aux humains de penser au(x) bon(s) choix et au système de les évoquer (coup de pouce) (cette dernière capacité n'étant pas vraiment classique).

4.2.3. Vue générale des solutions

a) présentation

Les *objectifs* de cette situation sont : inciter à faire un bilan, prendre du recul par rapport à l'action, enrichir la panoplie de tactiques des étudiants, leur faire prendre conscience des choix qu'ils ont effectués, permettre des comparaisons.

Les *données* consistent en un arbre présentant un résumé des différentes solutions "raisonnables" (recommandées par la méthode) ; dans la maquette, cet arbre présente au plus quatre solutions différentes.

La *tâche à accomplir* est intellectuelle et implicite; il s'agit d'une tâche de réflexion, pas d'une tâche de résolution de problème à proprement parler : observer l'arbre des solutions et analyser les informations.

Les actions des étudiants sur le logiciel consistent seulement en des demandes d'explications :

- demander des commentaires pour chacune des tactiques conduisant à une solution,
- demander un corrigé-type pour chacune de ces tactiques,
- demander des détails sur les résolutions en revenant au mode pas-à-pas sur l'une étape quelconque de ces solutions,

Les étudiants peuvent utiliser les stratégies suivantes:

- mettre en œuvre la méthode pour justifier ou commenter les différentes tactiques,
- prendre conscience de tactiques auxquelles ils n'avaient pas pensé mais qui conduisent à une solution,
- comparer différentes tactiques sur un même problème,
- prendre conscience des choix qui ont été faits pendant la résolution, les discuter et faire un bilan,
- prendre du recul par rapport à la résolution et en avoir une vue globale.

A la *demande des étudiants*, le système :

- affiche un corrigé-type,
- affiche un commentaire sur une solution,
- permet aux étudiants de faire une résolution pas-à-pas à partir des différentes étapes.

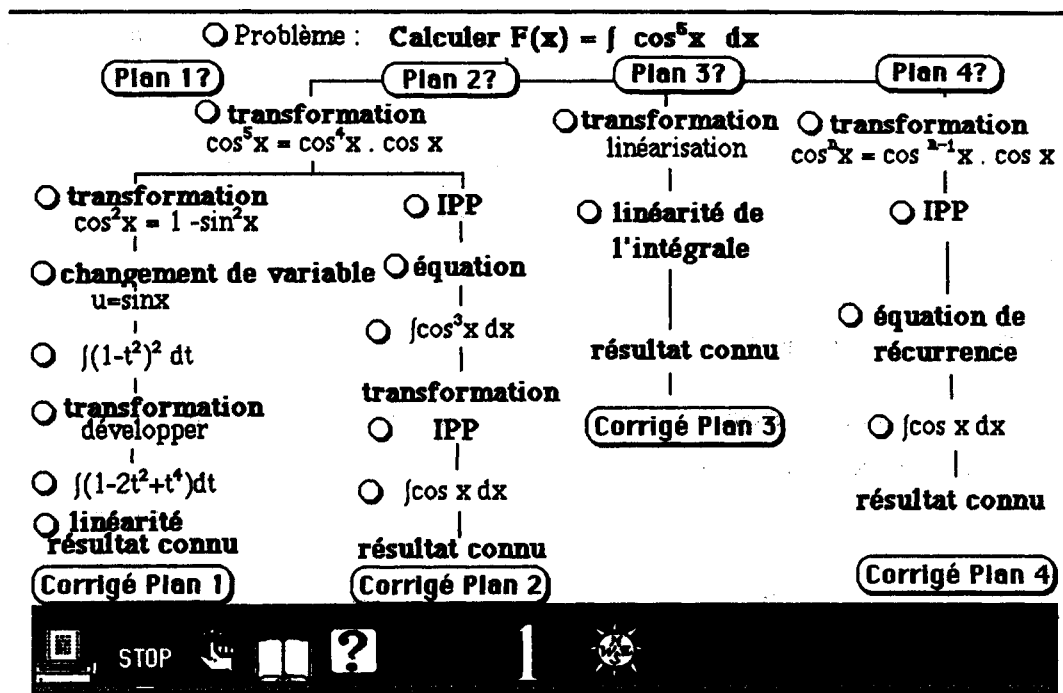


figure 6 : vue générale des solutions

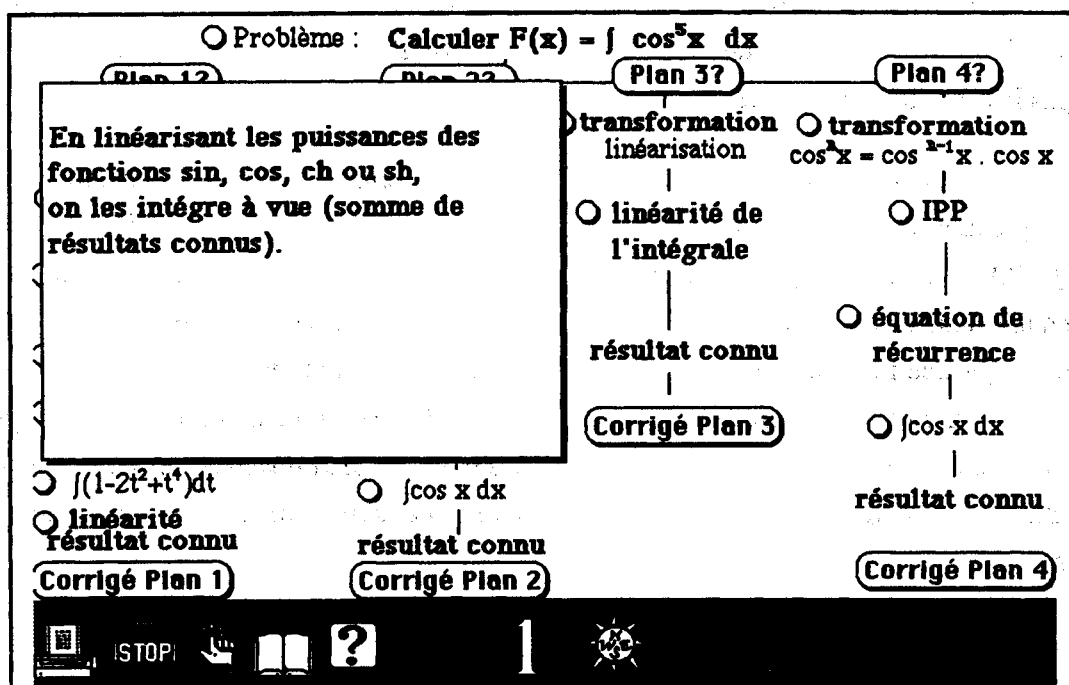


figure 7 : un commentaire sur la tactique correspondant au plan 3

b) observations

Cette situation a été appréciée par les étudiants et par les enseignants. Elle est originale par rapport à l'enseignement usuel et intéressante par rapport aux objectifs d'enseignement. Elle a presque toujours été utilisée après une résolution (en mode plan et

pas-à-pas). Les explications demandées concernent à une écrasante majorité chez les étudiants, les corrigés types et, chez les enseignants, les commentaires sur la tactique mise en œuvre.

Les améliorations à apporter concernent d'une part la présentation de certains écrans et, d'autre part le guidage pour inciter les étudiants à étudier les commentaires plutôt que les corrigés types.

c) spécifications pour ELISE

La situation de *vue générale* nécessite les mêmes connaissances que le mode plan, mais une *capacité de résolution* supplémentaire qui est de pouvoir obtenir plusieurs solutions raisonnables (i.e. obtenues par application de la méthode) sur un même exercice.

5. Bilan sur les explications des tests apurés des utilisateurs

Les tests semblent valider l'hypothèse de considérer l'explication en EIAO comme un processus explicatif défini par les situations d'interaction. Les étudiants dans le questionnaire, ont massivement écrit qu'ils ont apprécié les "explications" d'HYPER-ELISE. Pourtant ils ont peu regardé les messages explicatifs qui étaient ponctuellement donnés. On peut considérer que c'est bien *l'ensemble de l'interaction qui est explicative*, et non pas le seul contenu des messages explicatifs.

Ce peu d'intérêt pour les messages explicatifs rencontrés par d'autres chercheurs en EIAO 5[CHEVALLIER 1992]), mais aussi dans des domaines industriels ([WOGNUM 1990], [O'MALLEYxxx], [GILBERT XXX] s'explique, semble-t-il, par leur rôle secondaire dans l'interaction du point de vue des étudiants. Si les concepteurs accordent à ces messages une importance liée aux objectifs d'enseignement ou de recherche, il leur faut modifier les situations d'interaction pour susciter l'intérêt des étudiants pour ces messages. On peut résumer ainsi la constatation de tous ces chercheurs : *si l'on veut qu'un message soit considéré par l'usager, il faut qu'il soit attendu, que son contenu soit un enjeu de l'interaction.*

5.1. Types d'explications

Dans les maquettes, le concepteur a écrit au clavier toutes les résolutions et les messages explicatifs en s'inspirant "au maximum" du polycopié. Ces messages ont été testés en même temps que les situations.

La mise au point des situations d'interaction a permis de mettre en évidence différents *modes explicatifs*, liés aux objectifs d'enseignement : exposer une solution, commenter des choix, justifier des choix, évaluer des démarches, commenter des démarches, justifier

des démarches, synthétiser un raisonnement, donner des indices pour démarrer une résolution.

Puis l'analyse du contenu de chaque message explicatif affiché a permis, en typant chaque information qu'il contenait, de déterminer la *nature de ces informations*.

Par exemple: sur le sous-problème $\int e^t \sin t \, dt$

le message

"sur cette classe de fonctions

en appliquant 2 fois l'intégration par parties

on peut espérer

retrouver la fonction de départ"

contient les informations suivantes:

stratégie ou nature de la tactique

plan associé à la tactique

degré de certitude

objectif

le message

"on joue sur le fait que $\sin$ et exponentielle sont stables par deux dérivations et intégrations

en appliquant 2 fois l'intégration par parties

on peut espérer

retrouver la fonction de départ"

contient les informations suivantes:

principe de la tactique

plan associé à la tactique

degré de certitude

objectif

Ensuite, un retour sur la base de connaissances a été nécessaire pour typer de la même façon les informations de la base de connaissances, pour s'assurer que les informations utilisées dans les messages affichés y sont présentes et éventuellement compléter la base de connaissances.

Enfin, pour chacune des situations, nous avons défini des *contextes d'explication* caractérisés par :

- des informations sur l'étape de résolution (mode de résolution, profondeur de l'étape, type du sous-problème¹)
- le type du choix (bon, mauvais, bof)
- des informations sur le comportement des étudiants (parcours du logiciel déjà effectué...).

¹ Nous avons défini deux types de sous-problèmes. Un sous-problème père est un sous-problème qui peut être résolu en appliquant un plan associé à une tactique de la méthode. Un sous-problème fils est un sous-problème qui apparaît lorsqu'on applique ce plan. Les choix sur un sous-problème fils sont donc triviaux puisqu'on est dans une situation d'exécution de plan. Deux sous-problèmes successifs ne sont pas forcément en relation de filiation (exemple 2 de la maquette).

5.2. Formulation du message explicatif

Le travail pour formuler des messages explicatifs (du type de ceux qui sont présentés dans l'exemple ci-dessus) est alors exactement celui que nous avons réalisé pour CAMELIA. Il s'agit de formuler un message à partir:

- des informations sur la résolution provenant de l'arbre de résolution,
- des caractéristiques du message souhaité correspondant aux attributs des objets de la base de connaissances,
- des valeurs des attributs de la base de connaissances (ces valeurs sont considérées comme des chaînes de caractères instanciables, prédéfinies par le concepteur de la base de connaissances, et éventuellement accessibles aux enseignants qui voudraient les modifier¹).

5.3. Choix de la formulation du message explicatif

A partir des différentes formulations envisagées à des moments divers de l'interaction, nous avons essayé de définir des stratégies d'explication qui permettent de choisir parmi ces messages. Mais nous n'avons pu trouver des critères de choix. Nous avons également étudié très attentivement les deux protocoles d'interaction enregistrés sur cassette audio pour essayer d'analyser les demandes d'explication et les effets des messages explicatifs sur les étudiants. Mais il est très difficile de trouver une grille d'analyse, et nous avons trop peu de demandes d'explications pour pouvoir aller bien loin.

Cette question du choix du message reste très ouverte.

5.4. Perspectives

Il serait souhaitable de faire une nouvelle expérimentation centrée sur les messages explicatifs. Le principe de base serait de demander aux étudiants de justifier leur choix oralement en négociant la justification avec le co-apprenant, ou par écrit en tapant leur justification dans un champ. Ces justifications ne seraient demandées que sur des choix importants (ce que nous avons appelé les sous-problèmes pères). Les étudiants seraient invités à comparer leur choix avec celui du système. Plusieurs variantes expérimentales peuvent être envisagées, les objectifs de recherche étant² :

- de recueillir des corpus plus nombreux pour analyser l'effet (à court terme) des explications sur les étudiants,

¹ Ceci n'est pas souhaitable car des modifications sauvages posent des problèmes de stabilité (Cf. [Bruillard 1991b]).

² Les objectifs d'enseignement de cette modification de l'interaction ont été définis au chapitre 5 §4.3.4 b)

- d'essayer de cerner les principales préoccupations qu'ils ont au moment où est donnée l'explication afin que l'explication soit attendue),
- d'étudier les auto-explications des étudiants afin de tenter de dégager des profils d'utilisateurs.

6. Conclusion

Par rapport au thème de recherche en Intelligence Artificielle, nous pensons que notre travail apporte une avancée et une expérience sur deux thèmes principaux : celui de la méthodologie de développement de systèmes explicatifs, et celui de l'interaction explicative.

Dans cet article nous proposons une *méthode itérative de développement de systèmes explicatifs* basée sur l'analyse des besoins des utilisateurs à partir de la construction de maquettes et l'intégration de ces besoins aux spécifications du système en confrontant des prototypes (CAMELIA pour notre projet) avec les besoins déterminés à partir des tests des maquettes. Nous faisons également des propositions concernant la prise en compte de ces besoins dans l'acquisition¹ des connaissances de résolution de problèmes et d'explication.

L'*interaction explicative* est un des axes de recherche dominant de ce projet. Nous avons mis au point trois situations d'interaction qui définissent un processus explicatif en assurant une cohérence aux interactions en les reliant aux objectifs d'enseignement. Ces situations nous ont permis de définir plusieurs modes explicatifs et pour ces modes explicatifs plusieurs contenus possibles. Mais le problème du choix du contenu en fonction de la situation et du contexte reste ouvert. Nous faisons des propositions pour poursuivre les investigations expérimentales permettant d'avancer sur ce problème.

Si les situations d'interaction que nous avons mises au point sont spécifiques à l'EIAO et même à un champ de connaissances déterminé, les problèmes auxquels nous tentons de répondre sont soulevés par deux nombreux chercheurs y compris ceux qui s'intéressent à des systèmes industriels. La notion de situations d'interaction liées à la tâche et aux objectifs respectifs du système et des utilisateurs pour définir et structurer des explications pertinentes ainsi que les propositions méthodologiques que nous avons exposées, nous semble pouvoir intéresser les chercheurs branchés sur les utilisations des systèmes experts explicatifs.

¹ Au sens acquisition par un système expert.

BIBLIOGRAPHIE

- ARTIGUE M. (1988) *Ingénierie didactique*, Recherche en Didactique des Mathématiques, vol 9, n°2, p. 281-308, Grenoble, La Pensée Sauvage.
- AUSSENAC N. (1989) *Conception d'une méthodologie et d'un outil d'acquisition de connaissances expertes*, Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, Oct. 1989.
- BALACHEFF N. (1990a) *Problèmes de la construction d'une explication : aspects conceptuels et langagiers*, Revue d'Intelligence Artificielle, Revue d'Intelligence Artificielle, vol 4, n°2/1990, édition Hermès p. 149-160.
- BALACHEFF N. (1990b) *Nature et objet du raisonnement explicatif*, Actes du colloque : L'explication dans l'enseignement et l'EIAO, éditions Paris Onze, p 97-127.
- BALACHEFF N. (1991) *Contribution de la didactique et de l'épistémologie aux recherches en EIAO*, Actes des XIII^e Journées Francophones sur l'Informatique, Grenoble, IMAG p. 1-37.
- BARON M. (1982) *Un système pour exprimer et mettre en oeuvre des connaissances en manipulation formelle d'expressions*, Thèse de 3^{ème} cycle, Paris 6, Décembre 1982.
- BOURI M., DIENG R., KASSEL G., SAFAR B. (1990) *Vers des systèmes experts plus explicatifs*, Actes des 3^{èmes} journées nationales du PRC IA, Hermès, PARIS 1990, 340-355.
- BRUILLARD E. (1991) *EIAO et Mathématiques : une vision hypertexte des environnements d'apprentissage*, Thèse de l'Université du Maine.
- CARRIERE E. (1988) *Contribution à l'explication du raisonnement dans le système expert CAMELIA*, Rapport de DEA IARFAG, Université Paris 6.
- CARRIERE E., DELOZANNE E. (1989) *Niveaux de connaissances et phases d'apprentissage dans un tuteur intelligent*, Colloque d'Intelligence sur la Métaconnaissance, Le Mans, Septembre 1989, Cahier du Laforia n°77, p. 241-256.
- CARRIERE E., DELOZANNE E., VIVET M. (1990) *Des connaissances pour produire des explications dans un Tuteur Intelligent*, Revue d'Intelligence Artificielle, vol 4, n°2/1990, édition Hermès, p.113-124.
- CARRIERE E., DELOZANNE E. (1991a) *Modélisation des connaissances dans ELISE: tenir compte des objectifs d'enseignement*, Actes des Journées EIAO, PRC-IA, Editions de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, p. 105-120.
- CAUZINILLE-MARMECHE E. (1991) *Explications, guidages cognitifs et méta-cognitifs*, Actes du colloque : L'explication dans l'enseignement et l'EIAO, éditions Paris Onze p. 69-94.
- CAUZINILLE-MARMECHE E., MELOT A.-M. (1992) *Explications et apprentissage : l'analyse d'un dialogue tutoriel*, Actes des Deuxièmes Journées Explication du PRC-GDR-IA du CNRS, Sophia-Antipolis, juin 1992, p. 43-64.
- CHEVALLIER R. (1992) *Studia : mise en oeuvre d'un modèle dynamique de dialogue dans un Tuteur Intelligent*, Thèse de l'Université du Maine, Janvier 1992.
- Commission Inter-Irem Université, (1990) rédacteurs : ARTIGUE M., AUTHIER H., BESSOT D., DELALE A., GERMAIN G., JARRAUD P., LANIER D., LE GOFF J.P., LEGRAND M., ROBERT A., ROBINET J., ROGALSKI M., SACRE C., *Enseigner autrement les mathématiques en DEUG A première année*, bulletin Inter-Irem, 323 p.
- CLANCEY W.J. (1983) *The epistemology of a ruled-based expert system : a framework for explanation*, Artificial Intelligence, vol 20, 1983, p. 215-251.
- COUTAZ J. (1991) *Interfaces Homme-Machine un regard critique*, TSI, vol. 10, n°1.
- DELOZANNE E. (1988) *Des Outils d'explication en temps différé pour le système AMALIA*, Rapport de DEA IARFAG, Université Paris 6.
- DELOZANNE E., CARRIERE E. (1989) *Niveaux de connaissances dans un tuteur intelligent*, Actes des Journées EIAO, PRC-IA, Cachan, Décembre 1989, p. 89-98.
- DELOZANNE E., CARRIERE E. (1992) *Définir un processus explicatif, une étude de cas : la conception d'ELISE*, Actes des Deuxièmes Journées Explications du PRC-IA du CNRS, Sophia-Antipolis, Juin 1992, p. 185-208.
- DELOZANNE E. (1992) *Explications en EIAO Etude à partir d'ELISE, un logiciel pour s'entraîner à une méthode de calcul de primitives*, Thèse de l'Université du Maine, Janvier 1992.

- DELOZANNE E., *Un projet Pluridisciplinaire : ELISE, un logiciel pour donner des leçons de méthodes*, Revue de Didactique des Mathématiques, vol 14/1.2, pp 211-249 (numéro disponible en livre : M. Vivet, N. Balacheff, Didactique et Intelligence Artificielle, Grenoble, ed. La pensée Sauvage, 1994)
- DIENG R. (1990) *Méthodes et outils d'acquisition des connaissances*, ERGO-IA '90, Biarritz.
- EIAO (1989), rédacteurs BARON M., NICAUD J.-F., Actes des premières journées EIAO de Cachan, Rapport du LAFORIA n° 31/90, Institut Blaise Pascal des universités Paris VI, Paris VII et CNRS, 340 p.
- EIAO (1991), rédacteurs BARON M., GRAS R., NICAUD J.-F., Actes des deuxièmes journées EIAO de Cachan, Les Editions de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 262 p.
- EXPLICATION (1991) rédacteurs SERE M.- G., WEIL-BARAIS A., Actes du colloque Esprit *L'explication dans l'enseignement et l'EIAO*, Edition Paris Onze, 260 p.
- EXPLICATION (1992) Actes des Deuxièmes Journées Explication du PRC-GDR-IA du CNRS, Sophia-Antipolis, juin 1992
- JIMENEZ C. (1990) *Sur l'explication dans les systèmes à base de règles : le système PROSE*, Thèse de l'Université Paris VI.
- KASSEL G.(1986) , *Le système d'explication CQFE, une forme de méta-raisonnement intégrant règles et objets*, Thèse de l'Université Paris XI.
- PAQUETTE G. (1991) *Métaconnaissance dans les environnements d'apprentissage*, Thèse de l'Université du Maine, Le Mans, Octobre 1991.
- PY D. (1991) *L'exploration de la démonstration dans le projet MENTONIEZH* , Actes des Journées EIAO, PRC-IA, Editions de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, p. 19-32.
- ROBERT A., ROGALSKI J., SAMURCAY R. (1987) *Enseigner des méthodes*, Cahier de Didactique des Mathématiques n° 38, Irem, Université Paris 7.
- ROBERT A. (1992) *Problèmes méthodologiques en didactique des mathématiques*, Recherches en Didactique des Mathématiques, vol. 12, n° 1, p.33-58.
- ROGALSKI Marc (1988) *Comment chercher une primitive? Question de méthode...*, Polycopié DEUG A1, Université des Sciences et Techniques de Lille.
- ROGALSKI Marc (1990) *Enseigner des méthodes en mathématiques.*, In Commission Inter-Irem Université, Enseigner autrement les mathématiques en DEUG A première année, bulletin Inter-Irem, p. 65-79.
- ROGALSKI Marc (1992) , ce numéro.
- SAFAR B. (1987) *Le problème des explications négatives dans les systèmes experts : le système POURQUOI-PAS?*, Thèse de l'Université Paris XI, Orsay, décembre 1987.
- SCHOENFELD A.H. (1985) *Mathematical Problem Solving*, Academic Press.
- SCHOENFELD A.H. (1991) SMITH P, ARCAVI A., *Learning*, In R. Glaser (Ed.), Advances in Instructional Psychology (Vol. 4), Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- TENAUD I. (1991) *Une expérience d'enseignement de la géométrie en Terminale C : enseignement de méthode et travail en petits groupes*, Thèse de l'Université Paris VII.
- VIVET M. (1984) *Expertise mathématique et informatique : CAMELIA, un logiciel pour raisonner et calculer*, Thèse d'Etat, Université Paris 6.
- VIVET M. (1987) *Systèmes experts pour enseigner : métaconnaissances et explications*, COGNITIVA 87.
- VIVET M., DELOZANNE E., CARRIERE E. (1988) *Presentation of different aspects of AMALIA : a knowledge based tutor of mathematics*, Actes de l'Université Européenne sur les Tuteurs Intelligents, Le Mans, p. 155-170.