

8° R
93FF5
(4)

SYSTEMES EXPERTS ET ENSEIGNEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR

TOFORMATION

Coordination : Maryse QUERE

ENSEIGNEMENT

ouvrage publié avec le concours du

ULTIMEDIA

Ministère de la recherche et de la technologie (DIST)

67
1344336

08275-7-27997-10

SYSTEMES EXPERTS

ET

ENSEIGNEMENT ASSISTÉ PAR ORDINATEUR

Ouvrage présenté par le Centre Lorrain
d'Enseignement Assisté par Ordinateur

Philippe CHIFFOLEAU, professeur à l'Université de Nancy II, chercheur au CRIN, a rédigé l'ouvrage.

Daniel CABROL, professeur à l'Université de Metz-Suzanne Langer, a rédigé l'ouvrage.

François CHARPIN, professeur à l'Université Paris VII, a rédigé en partie l'ouvrage.

*Ouvrage publié avec le concours
du Ministère de la recherche et de la technologie (DIST)*

au Centre de Recherche en Informatique de Nancy, a rédigé l'ouvrage.

Marie-Chantal BAYON, professeur à l'Université de Nancy I, chercheur au CRIN, a rédigé l'ouvrage.

Jean-François NICARD, maître de conférences à l'École Normale Supérieure de Cachan, chercheur au Laboratoire de Recherche en Informatique de l'Université Paris Sud, a rédigé l'ouvrage.

Enfin, Maryse QUERE, professeur à l'Université de Nancy II, chercheur au CRIN, outre le travail de coordination, de lecture et de présentation, a plus particulièrement rédigé les (ou contribué aux) parties suivantes : Introduction, I.1, I.2, I.3, I.4, I.5, I.6, I.7, bibliographie et glossaire.

**Collection Autoformation et
Enseignement Multimédia**

Responsable : Françoise DEMAIZIÈRE

ISBN 2-7080-0648-7
© Éditions OPHRYS, 1991

OPHRYS, 6, avenue Jean-Jacques GASPARD
OPHRYS, 10 rue de Nèze, 57000 PARI

OPHRYS



8°A
93445
(7)

DL-27091991-27398

GA
L'ÉVALUATION

SYSTÈMES EXPERTS
ET
ENSEIGNEMENT ASSISTÉ PAR ORDINATEUR

Ouvrage présenté par le Centre Lorrain
d'Enseignement Assisté par Ordinateur

Ouvrage publié avec le concours
du Ministère de la Recherche et de la Technologie (DST)

Collection Automatisation et
Enseignement Multimédia
Responsable : Françoise DEMAZIÈRE

ISBN : 2-7080-0648-7
© Éditions OPHRYS, 1991

OPHRYS, 6, avenue Jean-Jaurès, 05002 GAP Cédex
OPHRYS, 10 rue de Nesle, 75006 PARIS



8° A
13042
(+)

Ce livre est un ouvrage collectif. Qui en sont les auteurs ?

Les noms des auteurs de chacune des monographies sont indiqués sur sa page de titre. Chacune a cependant fait l'objet de plusieurs relectures par d'autres membres du groupe.

La première partie a été l'objet d'un véritable travail en commun. Néanmoins, certaines personnes ont assuré la rédaction primitive de tel ou tel chapitre.

Philippe AEGERTER, chercheur à l'unité 88 de l'INSERM, a rédigé l'E.A.O. en médecine et la conclusion, et contribué à l'expertise du domaine.

Daniel CABROL, professeur à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, a rédigé l'E.A.O. des sciences physiques.

François CHARPIN, professeur à l'Université Paris VII, a rédigé en partie l'E.A.O. des langues.

Monique GRANDBASTIEN, professeur à l'Université de Nancy I et chercheur au Centre de Recherche en Informatique de Nancy (CRIN), a rédigé l'E.A.O. de l'informatique et l'expertise du domaine.

Marie-Christine HATON, professeur à l'Université de Nancy I et chercheur au CRIN, a rédigé l'environnement de l'apprenant, l'environnement de l'auteur et les outils de réalisation.

Jean-François NICAUD, maître de conférences à l'École Normale Supérieure de Cachan, chercheur au Laboratoire de Recherche en Informatique de l'Université Paris Sud, a rédigé l'expertise pédagogique et contribué à l'E.A.O. des mathématiques.

Enfin, Maryse QUERE, professeur à l'Université de Nancy II, chercheur au CRIN, outre le travail de coordination, de relecture et de présentation, a plus particulièrement rédigé les (ou contribué aux) parties suivantes : introduction, I.1.A, I.1.B.1, I.1.B.4, I.1.C, I.2.C, I.2.D, II.4, II.7, bibliographie et glossaire.

Le format des supports classiques (algèbre, géométrie, calcul, etc.) a la formation sur le poste de travail en usine (idéologie) en passant par le droit, l'informatique, l'automatique et la formation des travailleurs de tout les pays en développement. Il sera ainsi un outil de référence précieux pour les chercheurs, les responsables EAO et les formateurs des différentes disciplines ou secteurs d'activité.

François FERRAZZINI
Directeur pédagogique de CNLAD
Responsable de la section AFM

René SCHMITT
Directeur de CLAD

DL-270919072-10

Ce livre est un ouvrage collectif. Qui en sont les auteurs ?

Les noms des auteurs de chacun des chapitres sont indiqués sur la page de titre. Certains ont cependant été l'objet de plusieurs relectures par d'autres membres du groupe.

La présente partie a été l'objet d'un véritable travail en commun. Néanmoins, certaines personnes ont assuré la rédaction primitive de tel ou tel chapitre.

Philippe AEGERTER, chercheur à l'Unité 88 de l'INSERM, a rédigé l'E.A.O. en médecine et la conclusion, et contribué à l'expertise du domaine.

Daniel CABROL, professeur à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, a rédigé l'E.A.O. des sciences physiques.

François CHARPIN, professeur à l'Université Paris VII, a rédigé sa partie E.A.O. des langues.

Monique GRANDBASTIEN, professeur à l'Université de Nancy I et chercheur au Centre de Recherche en Informatique de Nancy (CRIN), a rédigé l'E.A.O. de l'informatique et l'expertise du domaine.

Marie-Christine HATON, professeur à l'Université de Nancy I et chercheur au CRIN, a rédigé l'environnement de l'expérimentation, l'environnement de l'auteur et les outils de réalisation.

Jean-François NICAUD, maître de conférences à l'École Normale Supérieure de Cachan, chercheur au Laboratoire de Recherche en Informatique de l'Université Paris Sud, a rédigé l'expertise pédagogique et contribué à l'E.A.O. des mathématiques.

Enfin, Marise QUERE, professeur à l'Université de Nancy II, chercheur au CRIN, outre le travail de coordination, de relecture et de présentation, a plus particulièrement rédigé les (ou contribué aux) parties suivantes : introduction, I.1.A, I.1.B.1, I.1.B.4, I.1.C, I.2.C, I.2.D, II.4, II.7, bibliographie et glossaire.

ISBN 2-7080-0548-7
© Editions GUYA, 1991

GUYA, 5, avenue Jean-Jacques, 92000 Nanterre
GUYA, 10 rue de Noale, 75006 PARIS



AVANT-PROPOS

Systèmes experts, Intelligence Artificielle (IA), Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO), les domaines abordés par ce volume sont en pleine actualité. On attend beaucoup des spécialistes de l'IA pour faire évoluer l'EAO et dépasser certaines de ses limites actuelles. Maryse Quéré, coordinatrice et co-auteur de l'ouvrage est l'une des personnalités les mieux connues du milieu des applications pédagogiques de l'informatique. Sa compétence, son dynamisme, ses qualités d'animatrice ont permis la réussite de plusieurs projets d'EAO français. Elle a su ici s'entourer des meilleurs spécialistes. On retrouvera parmi les auteurs bon nombre des chercheurs et des laboratoires français les mieux reconnus pour leurs travaux en IA et en EAO et qui ont été réunis pour le projet commun décrit dans l'introduction de ce livre. C'est donc un grand plaisir pour le directeur du CLEO et le directeur pédagogique du CNEAO, responsable de la collection AEM, de présenter conjointement le premier ouvrage proposé à la collection par le CLEO. Les objectifs et l'approche de nos deux centres sont semblables. Nous souhaitons aider à la promotion et au développement d'un EAO de qualité, en faisant se rejoindre la réflexion universitaire et les préoccupations d'opérationnalité des responsables de formation. Ce volume 7 est un exemple d'une telle démarche. Il évoque, avec la même rigueur les domaines de formation les plus divers, des disciplines scolaires ou universitaires classiques (algèbre, géométrie, chimie, latin) à la formation sur le poste de travail en usine (sidérurgie) en passant par le droit, l'informatique, l'automatique et la formation des travailleurs de santé des pays en développement. Il sera ainsi un outil de référence précieux pour les chercheurs, les responsables EAO et les formateurs des différentes disciplines ou secteurs d'activité.

Françoise DEMAIZIÈRE
Directeur pédagogique du CNEAO
Responsable de la collection AEM

Bernard SCHMITT
Directeur du CLEO

AVANT-PROPOS

Systèmes experts, Intelligence Artificielle (IA), Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO), les domaines abordés par ce volume sont en pleine actualité. On trouve beaucoup des spécialistes de l'IA pour faire évoluer l'EAO et dépasser certaines de ses limites actuelles. Néanmoins, l'EAO et ce domaine de l'enseignement est l'un des domaines les plus concernés du milieu des applications pédagogiques de l'informatique. La compétence, son développement, ses qualités d'enseignement ont permis la réussite de plusieurs projets EAO français. Elle a en fait encouragé des milliers de spécialistes. On retrouve parmi les auteurs bon nombre des chercheurs et des laboratoires français les mieux reconnus pour leurs travaux en IA et en EAO et qui ont été témoins pour le projet commun décrit dans l'introduction de ce livre. C'est donc un grand plaisir pour le directeur du CLEO et le directeur pédagogique du CNEAO, responsable de la collection AEM, de présenter conjointement le premier ouvrage proposé à la collection par le CLEO. Les objectifs et l'approche de nos deux centres sont semblables. Nous souhaitons aider à la promotion et au développement de l'EAO de qualité en faisant se rejoindre la réflexion universitaire et les préoccupations d'opérationnalité des responsables de formation. Ce volume est un exemple d'une telle démarche. Il évoque, avec la même rigueur les domaines de formation les plus divers, des disciplines anciennes ou universitaires classiques (algèbre, géométrie, chimie, latin) à la formation sur le point de travail en usine (automatique) en passant par le droit, l'informatique, l'enseignement et la formation des navigateurs de hauts degrés de développement. Il sera ainsi un outil de référence précieux pour les chercheurs, les responsables EAO et les formateurs des différentes disciplines ou secteurs d'activité.

Françoise LEMAITRE
 Directeur pédagogique du CNEAO
 Responsable de la collection AEM

Patrick SCHMITT
 Directeur du CLEO

PREFACE

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----|
| PREFACE..... | 1 |
| INTRODUCTION..... | 3 |
| PREMIERE PARTIE | |
| APPORTS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE A L'E.A.O..... | 9 |
| I.1 De l'E.A.O. à l'E.I.A.O..... | 11 |
| I.1.A Catégories de programmes utilisés en E.A.O..... | 12 |
| I.1.B Quelques exemples tirés de différentes disciplines..... | 17 |
| I.1.B.1 E.A.O. des mathématiques..... | 17 |
| I.1.B.2 E.A.O. de l'informatique..... | 22 |
| I.1.B.3 E.A.O. en médecine..... | 28 |
| I.1.B.4 E.A.O. des langues..... | 38 |
| I.1.B.5 E.A.O. des sciences physiques..... | 41 |
| I.1.C Historique et essai de conclusion..... | 52 |
| I.2 L'enseignement intelligemment assisté par ordinateur..... | 55 |
| I.2.A Expertise du domaine..... | 55 |
| I.2.A.1 Les connaissances à représenter..... | 56 |
| I.2.A.2 Les représentations choisies..... | 62 |
| I.2.A.3 Perspectives..... | 66 |
| I.2.B Expertise pédagogique..... | 67 |
| I.2.B.1 La pédagogie dans le module du domaine..... | 68 |
| I.2.B.2 Le module pédagogique..... | 69 |
| I.2.B.3 Le module de l'élève..... | 71 |
| I.2.B.4 Conclusion..... | 72 |
| I.2.C L'environnement de l'apprenant..... | 72 |
| I.2.D L'environnement de l'auteur..... | 77 |
| I.2.E Les outils de réalisation..... | 80 |

DEUXIEME PARTIE

| | |
|---|-----|
| MONOGRAPHIES | 83 |
| II.1 AULA : la morphologie latine assistée par ordinateur | 85 |
| II.2 CONSULT-EAO : un tuteur pour l'apprentissage du diagnostic médical destiné aux travailleurs de santé des pays en développement | 101 |
| II.3 EXP'AIR : un logiciel pour l'apprentissage de l'interprétation des données de spectroscopie infra-rouge | 123 |
| II.4 SERMA : un logiciel pour l'apprentissage de l'automatique linéaire utilisant des systèmes experts solveurs | 149 |
| II.5 SAIDA : un environnement pour la formation aux concepts avancés de l'informatique | 169 |
| II.6 CONSOL : un système de formation aux consignes d'exploitation dans la sidérurgie | 195 |
| II.7 JURIS TUTOR : un système intégré pour l'enseignement du droit | 215 |
| II.8 APLUSIX : un logiciel pour enseigner l'algèbre | 241 |
| II.9 ARCHIMEDE : un système expert d'enseignement de la géométrie | 265 |
| CONCLUSION | 289 |
| BIBLIOGRAPHIE | 291 |
| GLOSSAIRE | 295 |



PREFACE

L'ouvrage dont la rédaction a été coordonnée par Maryse Quéré, «Systèmes experts et E.A.O.», est ambitieux et donc intéressant à plus d'un titre. Il tente en effet de faire le point sur l'union de deux sujets en pleine évolution : l'Enseignement Assisté par ordinateur (E.A.O.) et l'Intelligence Artificielle (I.A.).

L'E.A.O. a fait son apparition dans l'enseignement ou la formation dès que les ordinateurs sont sortis du laboratoire, et ont permis l'accès à des mémoires importantes (années 60). Toutefois, les premiers essais se contentaient de reproduire le procédé des Q.C.M. (Questions à Choix Multiple), que j'ai vu utiliser en 1948 dans les «quiz» des examens du MIT aux Etats Unis.

Mais l'Art et la Science de l'informatique se développaient dans l'industrie, les centres de recherche, les universités. Aussi expérimentale que théorique, une «*Mécanique des Signes*» s'affirmait dans les années 70. Quel pouvait être alors défi plus intéressant que de chercher à l'utiliser pour imiter et modéliser les actions de perception et de raisonnement de l'être humain ? La reconnaissance des formes (R.F.), l'I.A. prenaient ainsi leur essor, et posaient en retour beaucoup de questions à la mécanique des signes : manipulation de symboles, représentation des connaissances, hérédité des types, utilisation de langages formels, complexité de calcul, machines parallèles, etc. Un nouveau type de modélisation se dégagait : la modélisation symbolique des «*Systèmes Experts*», par opposition à la modélisation numérique des équations différentielles de la Physique ou de la Mécanique classique.

En tentant de construire des «machines intelligentes», les pionniers s'interrogeaient sur les multiples aspects des capacités humaines les plus évoluées : perceptions visuelles et auditives, raisonnement, langage. Ils essayaient de les reproduire de façon constructive, c'est-à-dire par des programmes informatiques exécutables par des ordinateurs. Changement radical de méthodologie par rapport aux efforts séculaires des psychologues ou des philosophes, qui n'avaient pu qu'en disserter, de façon très savante certes, mais sans rien pouvoir prouver. Comme en Médecine du temps de Claude Bernard, la *méthode expérimentale* faisait irruption

SYSTEMES EXPERTS ET ENSEIGNEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR

dans le domaine des signes et des connaissances. Véritable révolution, incomprise ou plutôt refusée par les maîtres des disciplines classiques, qui s'obstinaient à ne voir dans l'informatique qu'une technique d'ingénieur et dans les ordinateurs que des super-calculateurs numériques. Nous ne craignons pas d'affirmer qu'une nouvelle culture est en train de naître, difficile à comprendre et à assimiler pour les générations en place, mais qui influera profondément sur notre manière de représenter et de comprendre le Monde et l'Homme.

Il était donc naturel que l'I.A. et la R.F. soient introduites en E.A.O. pour tenter de le rendre plus «humain». Quels progrès cela entraîne-t-il ? Peut-on espérer remplacer un jour le professeur humain par une «machine intelligente» ? Autant d'interrogations auxquelles répond le livre *Systèmes experts et E.A.O.* Le point est fait sur l'état de l'art en I.A., en E.A.O. et en E.I.A.O., où la lettre I indique qu'une application de l'I.A. est faite à l'E.A.O. Intelligemment, les auteurs précisent que, si pour rendre intelligent un didacticiel (logiciel d'enseignement) il est nécessaire d'utiliser des techniques d'I.A., tous les didacticiels qui utilisent l'I.A. n'apparaissent pas forcément comme intelligents. L'analyse de ce qu'on attend et de ce que l'on a obtenu dans le domaine de l'E.I.A.O. est donc précisée, dans l'optique de l'utilité pédagogique, pierre de touche finale. Les réponses dépendent bien sûr des matières enseignées : les pédagogies E.I.A.O. de l'Informatique, de la Médecine, de la Linguistique, de la Physique sont particulièrement examinées. Une seconde partie du livre présente cas par cas des réalisations françaises d'E.I.A.O., et montre d'abondance que les pédagogues et chercheurs en I.A. ont fait plus qu'échanger des propos mondains. Ils ont abouti à des produits dont ils peuvent être fiers. La pédagogie en profite, soyons-en assurés ; mais aussi l'I.A. qui ne peut convaincre les incrédules que par des réalisations concrètes indiscutables.

Ce livre très dense, très bien informé, assez facile à lire, est une mine d'informations sur l'E.I.A.O. Il est donc très utile pour ceux que le sujet intéresse. Et comme toutes les mises au point sérieuses et bien faites, il permettra d'aller plus loin, et de développer un domaine très utile et intéressant, et peut-être, qui sait, de convaincre certains sceptiques...

Jean-Claude SIMON

Professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie

INTRODUCTION

Cet ouvrage est le premier livre publié en langue française sur les apports de l'intelligence artificielle*¹, et plus précisément les systèmes experts*, à l'enseignement assisté par ordinateur (E.A.O.)*. Fallait-il pour autant refaire en français ce qui existe déjà, en plusieurs exemplaires, en langue anglaise (voir la bibliographie) ? Tel n'a pas été notre propos, et ce pour deux raisons : la première est que nous pensons que les lecteurs potentiels de tels livres sont tout à fait capables de les lire dans leur langue d'origine. La seconde est que l'idée d'écrire ce livre nous est venue d'un programme coordonné de recherche qui vient juste de s'achever, programme au cours duquel plusieurs équipes françaises ont développé des «didacticiels intelligents»², dans le but de réaliser une espèce de transfert de compétence auprès de tous ceux à qui trotte dans la tête l'idée de réaliser un produit de ce type. De ce fait, nous avons d'emblée l'ambition de toucher un public bien plus vaste que celui des lecteurs des ouvrages anglosaxons dont il a été question plus haut.

Quel est ce public ? Pour répondre un peu plus précisément à cette question, il nous faut parler des différents «courants de pensée» qui s'intéressent, en France ou dans les pays francophones, à l'«enseignement intelligemment assisté par ordinateur» (noté E.I.A.O.³ dans la suite) :

- les personnes qui s'intéressent, à des titres divers, à la didactique* de telle ou telle discipline (responsables de la formation de formateurs, universitaires, chercheurs en didactique...). Ce livre est surtout fait pour eux, puisque la plus grande partie des auteurs appartient à cette catégorie, et sont donc à même de parler le même langage qu'eux et de toucher au plus près leurs préoccupations ;

1 Les mots marqués d'une astérisque en exposant sont supposés connus du lecteur. Néanmoins, pour éviter des ambiguïtés, une brève définition en est donnée dans un glossaire situé à la fin de l'ouvrage.

2 Nous reviendrons ultérieurement sur la signification que nous donnons à ce terme.

3 Même remarque que ci-dessus.

SYSTEMES EXPERTS ET ENSEIGNEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR

- les informaticiens, développeurs de produits pédagogiques ou de systèmes experts. Ce livre s'adresse également particulièrement à eux. En effet, les informaticiens qui ont participé aux projets du programme puis à la rédaction du livre ont eu à cœur d'extraire, au-delà des préoccupations disciplinaires, les caractéristiques générales des systèmes qui ont été réalisés et de reclasser ces caractéristiques dans la typologie habituellement utilisée pour la construction des «tuteurs intelligents»¹ ;
- les chercheurs en psychologie cognitive*. Il se trouve qu'aucun chercheur de cette catégorie n'a participé au programme, pour des raisons historiques sur lesquelles nous reviendrons plus loin. Les résultats pèchent de ce côté et les auteurs en sont conscients. Ce livre interpelle donc les psychocogniticiens et constitue en quelque sorte un appel pour des poursuites réellement pluridisciplinaires ;
- les linguistes, pour tout ce qui concerne les modes de communication entre l'homme et la machine. Un des projets traite de l'enseignement d'une langue et, au-delà, des modèles de description d'une langue. Les autres projets proposent des modes de communication plus «directs». Le débat ouvert sur ce problème il y a quelques années est loin d'être clos ;
- les enseignants, les formateurs (d'adultes) et leurs institutions. Leur intérêt pour l'enrichissement de l'E.A.O. grâce aux techniques d'intelligence artificielle ne date pas d'hier, mais ils aimeraient souvent qu'au-delà des discours les praticiens leur apportent des illustrations concrètes de l'expression d'Alain BONNET, «promesses et réalités» [Bonnet 84]. En voici neuf, allant du produit commercialisé sur micro-ordinateur à la maquette de laboratoire d'exportation difficile, en passant par le prototype échangeable ;
- enfin, et le fait de les citer en dernier n'est pas signe d'une moindre importance, les personnes qui sont à la recherche d'une autre façon de se former.

Nous avons parlé plus haut de raisons historiques. Quelle est donc la genèse de cet ouvrage ? Peu de temps avant sa suppression, l'Agence de l'Informatique (ADI) avait fait approuver par son ministère de tutelle la mise en place d'un Projet National E.A.O., dont la direction avait été

¹ Nous employons volontairement, dans cette introduction, la plupart des termes utilisés dans le domaine. Comme nous l'avons déjà dit, ces termes seront réexpliqués au début de la première partie de l'ouvrage.

INTRODUCTION

confiée à Jean-Pierre HUBAC¹. Parmi les actions de ce projet national, un appel à projets publié en 1986 avait porté sur la réalisation de produits de formation utilisant des systèmes experts. Nous en reprenons ici les termes les plus importants.

Aujourd'hui, les outils de type intelligence artificielle et les systèmes experts commencent à se généraliser et il est apparu intéressant de chercher à lancer leurs premières applications pédagogiques. Les 30 et 31 janvier 1986, un séminaire organisé par l'ADI a donc réuni des chercheurs, des industriels spécialisés en réalisation de systèmes experts, des formateurs et des enseignants qui réalisent et utilisent des didacticiels. Des démonstrations et des ateliers de réflexion ont permis de confronter les capacités de nouveaux outils aux besoins des applications pédagogiques. En particulier, les systèmes d'E.A.O. pourraient ainsi présenter des possibilités de description des connaissances étendues, moins de directivité, tout en bénéficiant d'un mode de suivi de l'élève plus élaboré puisqu'il portera non plus seulement sur les réponses mais sur les modes de raisonnement de l'élève. De ce séminaire est née l'idée du présent appel à projets, qui a pour objectif de susciter dans ce domaine des réalisations et des expérimentations ne nécessitant pas de moyens exceptionnels et préparant une large diffusion de ces outils.

Le présent appel concerne des projets utilisant des systèmes experts, dans des applications ayant trait à l'enseignement et à la formation initiale ou continue. Ces applications pourront être des outils de génie didacticiel, de gestion pédagogique ou bien entendu des didacticiels de toutes disciplines. Les projets devront autant que possible utiliser des outils généraux d'intelligence artificielle déjà développés (langage PROLOG, moteurs d'inférences, outils de gestion et d'acquisition des connaissances...) disponibles sur le marché ou immédiatement utilisables. Les projets seront proposés par des équipes pouvant comprendre des auteurs, des chercheurs, des éditeurs, des sociétés d'informatique. Le produit réalisé devra faire l'objet d'une expérimentation en vraie grandeur, prévue par l'équipe dès la description du projet. Des expérimentations complémentaires pourront être organisées par l'Agence de l'Informatique. Le produit devra fonctionner sur des matériels et sous des systèmes largement répandus et utilisés pour la formation.

L'avenir devait apporter quelques perturbations dans cette belle ordonnance. Un comité d'experts examina entre le 15 juillet et le 30 septembre les soixante-dix projets proposés. Parmi ces propositions, douze

¹ Dont nous saluons ici la mémoire.

SYSTEMES EXPERTS ET ENSEIGNEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR

furent retenues¹, qui correspondaient aux critères énoncés dans l'appel et étaient représentatives de disciplines variées. Le 31 décembre 1986, l'ADI était dissoute et le Ministère de l'Industrie était chargé de sa liquidation. Au terme d'un grand nombre de discussions, ce dernier accepta de maintenir le programme² et en confia par convention la gestion scientifique et financière au Centre Lorrain d'Enseignement assisté par Ordinateur. C'est la raison pour laquelle le CLEO patronne cet ouvrage. Le CLEO s'entoura d'un groupe d'experts et les projets furent pour l'essentiel menés à bien, avec une coordination plus réduite que celle qui était initialement prévue. Quant à l'équipe de rédaction du livre, elle comprend d'une part des membres d'une partie des équipes impliquées dans l'appel d'offres³, d'autre part trois des experts retenus, dont deux présentent également un logiciel qu'ils ont réalisé. Voilà pour l'historique.

Nous terminerons cette introduction, comme c'est l'usage, en donnant quelques guides de lecture. Le livre est, comme on l'a vu plus haut, plus qu'une collection d'articles. Et, pour l'affirmer davantage, nous avons placé les descriptions des projets, appelées monographies, en seconde partie, leur imposant en outre un plan identique. La première partie se veut une synthèse des projets, dont le plan a été établi à partir des caractéristiques habituellement attribuées aux tuteurs intelligents. Les auteurs s'en sont réparti la rédaction, selon leurs compétences, leurs goûts et leur disponibilité. C'est dans cette première partie que se trouve la substantifique moëlle de l'ouvrage, les monographies se contentant de présenter les aspects spécifiques et l'environnement. Faut-il pour autant lire ce livre séquentiellement de la première à la dernière page ? Nous pensons que non, à cause de la grande variabilité des publics que nous avons l'intention de toucher, publics que nous avons décrits au début de cette introduction. Et nous conseillons de manipuler ce livre comme un hypertexte*, avec les suggestions suivantes :

-
- 1 L'enveloppe financière globale de l'appel à projets était de deux millions de francs, non compris le travail des permanents de l'ADI.
 - 2 Il nous est ici agréable de remercier Monsieur DUQUAY (DGI-CERICS) de la confiance qu'il nous a toujours témoignée, et sans qui ce livre n'aurait pas vu le jour.
 - 3 La participation à la rédaction du livre n'était pas contractuelle, donc le livre ne présente pas la totalité des projets.

INTRODUCTION

- les lecteurs très familiers de l'E.A.O. ou des systèmes experts et qui ne sont pas spécialement attachés à une discipline pourront commencer par la première partie, puis lire, dans la seconde partie, les monographies qui les intéressent ;

- les personnes qui ne connaissent l'E.A.O. que par l'utilisation de didacticiels dans une discipline, et pas du tout les systèmes experts, prendront comme point d'entrée dans le livre la ou les parties relatives à cette discipline. Si on prend l'exemple des mathématiques, cela donne : d'abord le paragraphe sur l'E.A.O. des mathématiques, puis les monographies ARCHIMEDE et APLUSIX. Quand ils auront terminé, les lecteurs auront le choix entre parcourir d'autres monographies ou étudier dans son intégralité la première partie pour avoir des ouvertures sur les autres apports possibles de l'intelligence artificielle à l'E.A.O. ;

Nous utilisons deux sortes de références bibliographiques. Les références générales, correspondant à des ouvrages que le lecteur pourra facilement se procurer en bibliothèque ou en librairie, sont citées entre crochets et explicitées dans la bibliographie située à la fin de l'ouvrage. Les références destinées à justifier des affirmations, et qui proviennent en général de revues spécialisées, sont mises en notes de bas de page.

Les lecteurs intéressés sont invités à se mettre en contact direct avec les équipes dont ils trouveront les adresses dans les monographies.

SYSTEMES EXPERTS ET ENVOI D'ORDONNEMENTS PAR ORDINATEUR

Les auteurs ont travaillé de 1982 à 1984 au sein de l'Institut de Recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux. Ils ont été aidés par les membres de l'équipe de recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux. Les auteurs ont travaillé de 1982 à 1984 au sein de l'Institut de Recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux. Ils ont été aidés par les membres de l'équipe de recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux.

Nous remercions tout d'abord les auteurs de l'ouvrage. Les auteurs ont travaillé de 1982 à 1984 au sein de l'Institut de Recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux. Ils ont été aidés par les membres de l'équipe de recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux. Les auteurs ont travaillé de 1982 à 1984 au sein de l'Institut de Recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux. Ils ont été aidés par les membres de l'équipe de recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux.

Les auteurs ont travaillé de 1982 à 1984 au sein de l'Institut de Recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux. Ils ont été aidés par les membres de l'équipe de recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux.

1. Les auteurs ont travaillé de 1982 à 1984 au sein de l'Institut de Recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux. Ils ont été aidés par les membres de l'équipe de recherche en Informatique de l'Université de Bordeaux.
2. Il nous est très agréable de remercier Monsieur DUQUAY (DGI-CERCS) de la confiance qu'il nous a témoignée, et sans qui ce livre n'aurait pu voir le jour.
3. La participation à la rédaction de l'ouvrage par les auteurs de ce livre ne présente pas le caractère de...

I.1 DE L'E.A.O. A L'E.I.A.O.

Le but de ce chapitre est de donner un bref aperçu des différentes conceptions du terme Enseignement Assisté par Ordinateur dans les disciplines couvertes par les monographies, puis de voir comment la transition a pu s'opérer entre les catégories traditionnelles et l'E.I.A.O., en tentant d'expliquer dans quelle mesure les nouvelles conceptions ont pu être acceptées. Mais comme nous vous avons promis, dans l'introduction, de vous donner quelques définitions, en voici tout de suite quelques-unes à identifier le sujet :

PREMIERE PARTIE

APPORTS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE A L'E.A.O.

Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur

Si on admet que l'expression Enseignement Assisté par Ordinateur caractérise toute forme d'enseignement dans laquelle l'ordinateur joue un rôle d'auxiliaire, l'expression E.I.A.O. caractérise habituellement l'E.A.O. dans lequel sont utilisées des techniques d'intelligence artificielle (en quelque sorte le mariage de l'E.A.O. et de l'I.A.). Cette définition est la plus générale, et tout système présentant ces deux caractéristiques entrera dans la "grande" famille de l'E.I.A.O. Cependant, nous bien pour rendre un didacticiel intelligent, il est nécessaire d'utiliser des techniques d'intelligence artificielle. On verra cependant plus loin qu'il y a un degré intermédiaire d'intelligence dans certains systèmes qui n'utilisent pas de

PREMIERE PARTIE

APPORTS DE
L'INTELLIGENCE
ARTIFICIELLE A
L'E.A.O.

I.1 DE L'E.A.O. A L'E.I.A.O.

Le but de ce chapitre est de donner un bref aperçu des différentes acceptions du terme Enseignement Assisté par Ordinateur dans les disciplines couvertes par les monographies, puis de voir comment la transition a pu s'opérer entre les catégories «traditionnelles» et l'E.I.A.O., en insistant notamment sur les problèmes posés par la représentation des connaissances dans telle ou telle discipline. Il constitue en quelque sorte un résumé de ce que le lecteur doit savoir pour tirer parti de la lecture des monographies. Mais comme nous vous avons promis, dans l'introduction, de vous donner quelques définitions, en voici tout de suite deux destinées à démythifier le sujet :

Didacticiel intelligent

Si on fait l'hypothèse qu'un didacticiel est un logiciel destiné à l'apprentissage, cette expression laisse supposer que les didacticiels courants sont dépourvus d'intelligence. Mais qu'appelle-t-on intelligence dans un programme ? Une certaine capacité à effectuer des tâches qui n'ont pas été explicitement prévues par le programmeur, capacité qui différencie, par exemple, un violoniste humain d'un automate qui joue du violon : l'automate ne fera pas de fausse note mais n'ajoutera pas non plus de cadence.

Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur

Si on admet que l'expression Enseignement Assisté par Ordinateur caractérise toute forme d'enseignement dans laquelle l'ordinateur joue un rôle d'auxiliaire, l'expression E.I.A.O. caractérise habituellement l'E.A.O. dans lequel sont utilisées des techniques d'intelligence artificielle (en quelque sorte le mariage de l'E.A.O. et de l'I.A.). Cette définition est la plus générale, et tout système présentant ces deux caractéristiques entrera dans la - grande - famille de l'E.I.A.O. Entendons-nous bien : pour rendre un didacticiel intelligent, il est nécessaire d'utiliser des techniques d'intelligence artificielle. On verra cependant plus loin qu'il y a un degré intermédiaire d'intelligence dans certains systèmes qui n'utilisent pas de

¹ D. Feneuille, *Ordinateur et lecture*, in [TSI 88], pp. 79-87.

telles techniques, et qu'a *contrario* tous les didacticiels qui utilisent des techniques d'intelligence artificielle ne sont pas pour autant intelligents. Donnons un premier contre-exemple. Il est communément admis que les êtres doués d'intelligence diffèrent des machines qui en sont dépourvues par au moins trois caractéristiques : ils perçoivent des stimuli avec leurs sens, ils comprennent et parlent un langage, ils raisonnent. Actuellement, on sait rendre des machines intelligentes : des robots qui voient, des ordinateurs qui comprennent et traduisent, des automates qui jouent aux échecs. Des machines qui ont de telles capacités ne supportent pas nécessairement des didacticiels intelligents : si l'ordinateur «voit et reconnaît» l'apprenant (au lieu de lui demander son nom), mais qu'ensuite il se contente de lui soumettre un ensemble de questions à choix multiples, on n'aura pas fait un réel progrès !

Nous reprenons, dans le paragraphe qui va suivre, les classifications utilisées dans [OCD 87]. Le plan en est le suivant : tout d'abord, nous citons les catégories de programmes utilisés dans la formation, qui sont en général communes à plusieurs disciplines. Mais ce recensement est technique et, par là même, relativement indépendant des types d'activité rencontrés dans l'enseignement ou l'apprentissage. C'est la raison pour laquelle nous introduisons ensuite cette dimension plus pédagogique, pour certaines des disciplines auxquelles correspondent les monographies.

I.1.A CATEGORIES DE PROGRAMMES UTILISES EN E.A.O.

Programme d'application

C'est un programme qui calcule un résultat en réponse à une demande spécifique de l'utilisateur, par exemple, en mathématiques, un programme d'intégration qui utilise la règle de Simpson pour trouver l'intégrale numérique d'une fonction. La tâche de l'utilisateur, que ce soit l'enseignant ou l'apprenant, est de choisir une fonction ou ses limites, et le programme fournit la valeur numérique correspondant à l'intégrale. Un autre exemple serait, en lettres, l'interrogation d'une base de données textuelles. L'opération est dirigée par l'utilisateur car c'est lui qui déclenche la réponse de l'ordinateur. Font partie de cette catégorie les «animations explicatives».

Programme d'exercices pratiques ou environnement d'entraînement

C'est un programme qui permet de répéter un ou plusieurs modèles d'exercices sur des données de base. Il est demandé à l'apprenant de répondre sur le clavier aux questions posées. Le programme lui indique si sa réponse est ou non correcte. Le dialogue est dirigé par l'ordinateur, puisque c'est lui qui prend les décisions quant à l'activité de l'apprenant. Le noyau de l'exercice est constitué par un sous-programme qui compare la réponse de l'apprenant avec la réponse correcte, celle-ci étant soit conservée en mémoire, soit produite par un algorithme au moment voulu.

Quelle est l'efficacité de ces programmes d'exercices ? Certaines études d'évaluation font état d'une performance améliorée et d'une motivation accrue ; d'autres semblent indiquer que l'amélioration provient de l'accroissement du nombre d'exercices, qu'ils soient effectués avec ou sans support informatique ; d'autres enfin ne parviennent pas à démontrer que les apprenants en tirent le moindre bénéfice. Deux catégories d'apprenants bénéficient le plus de la pratique des programmes d'exercices : les apprenants des toutes premières années du primaire et les apprenants les moins doués. Ceci est particulièrement vérifié avec des programmes multimédia d'apprentissage de la lecture assisté par ordinateur¹.

Programme tuteur

Un tuteur (en anglais *tutor*) est une catégorie spécifique de didacticiel dans laquelle sont incluses toutes les fonctions que remplit habituellement l'enseignant : transmission des connaissances et du savoir-faire, évaluation de leur acquisition, encouragements, remédiation en cas d'erreurs, adaptation à la progression de l'apprenant, tout en maintenant le cap fixé par l'objectif visé. Un tuteur traditionnel, en E.A.O., est un programme directement inspiré des techniques de l'enseignement programmé. L'intelligence de l'enseignant humain a été incluse, une fois pour toutes, dans le programme, par une personne qu'on appelle un auteur, et qui a donc prévu tous les cas : toutes les réponses possibles à une question (correctes ou erronées), les explications à fournir en cas de réponse fautive, l'aide à apporter si l'apprenant ne sait pas répondre, le nombre d'exercices à poser en fonction des performances, la petite musique d'encouragement (ou le score) en cas de réponse juste, le choix de la séquence d'apprentissage

¹ D. Feneuille. *Ordinateur et lecture*. In [TSI 88], pp. 79-87.

SYSTEMES EXPERTS ET ENSEIGNEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR

suiuante, etc. Les informaticiens ont réalisés des progiciels permettant de produire des tuteurs. Ces progiciels sont appelés langages d'auteurs* ou systèmes d'auteurs*, et nous y ferons quelquefois référence. Aujourd'hui, il y a encore relativement peu de «bons» programmes tuteurs disponibles. L'utilisation de l'adjectif «bon» doit être considérée comme un jugement subjectif, étant donné que l'efficacité pédagogique de ces programmes n'est pas encore démontrée. D'une manière générale, leurs capacités de diagnostic sont approximatives, d'où la critique, non encore réfutée, qu'ils ne peuvent enseigner aussi efficacement qu'un professeur.

Les tuteurs intelligents sont expérimentés pour pallier cette lacune. Ils ont permis, en outre, l'émergence d'une nouvelle catégorie de programmes : les programmes de résolution de problèmes. Qu'appelle-t-on un tuteur intelligent ? Comme pour un didacticiel, c'est sa capacité à effectuer les tâches qu'on vient de décrire, sans qu'elles aient été explicitement prévues par l'auteur. Dans un premier temps, nous nous limiterons à un exemple, celui de toutes les réponses possibles à une question. Un auteur de didacticiel écrira explicitement, dans le programme, les réponses fausses usuelles qu'il a repérées dans la population cible et les messages à délivrer dans chaque cas. Un tuteur intelligent devrait connaître tous les raisonnements erronés qui conduisent à ces réponses fausses et savoir reconnaître l'application, par un apprenant, de l'un ou l'autre de ces raisonnements, pour engendrer à partir de ses connaissances l'explication correspondante. Facile à dire, et un peu moins à faire.

Programme de simulation

Le but d'un programme de simulation est de représenter une situation du monde réel dans laquelle on peut changer la valeur de tel ou tel facteur, ce qui modifie l'image du monde représenté. L'étudiant peut utiliser soit des données en mémoire, soit ses propres données. Le programme imprime des graphiques, des tableaux et des commentaires reprenant les données fournies, afin de représenter les effets produits. Toutes les sciences, expérimentales ou humaines, qui utilisent des modèles probabilistes, sont d'excellentes candidates à des programmes de simulation. En raison de la complexité de nombreuses relations et du caractère souvent imprévisible de leurs effets, le programme de simulation crée une situation de résolution de problème dans laquelle l'objectif de l'utilisateur est en général de découvrir les règles sous-jacentes par une sorte de démarche scientifique.

Le programme de simulation, comme le programme d'application, ne remplace pas le professeur. Si on se contente de proposer la simulation et de laisser l'apprenant effectuer seul ses «découvertes», l'expérience échoue. Et si le programme d'application fait gagner du temps en classe, le programme de simulation peut absorber beaucoup de temps, même lorsqu'il est utilisé de façon soigneusement organisée. Les spécialistes distinguent la simulation modélisante*, la simulation dynamique*, la simulation méthodologique*, la simulation opérationnelle*.

Modélisation par ordinateur

C'est l'activité qui consiste à construire des programmes informatiques constituant des modèles d'événements, de systèmes ou d'appareils. La situation est contrôlée par l'apprenant, qui est libre d'écrire le programme qu'il souhaite dans le langage de programmation choisi. Parmi ces langages, BASIC* a été rapidement détrôné par LOGO*. En France, quelques expériences ont été faites avec LSE*. Il faut aussi citer SMALLTALK* et PROLOG*.

Profitons de ce paragraphe dans lequel viennent d'être introduits des noms de langages connus comme des langages de l'intelligence artificielle pour démolir un autre mythe, celui des didacticiels écrits avec des langages dits d'intelligence artificielle. On en voit régulièrement dans les communications proposées pour différents colloques, le plus souvent en PROLOG, plus rarement en SMALLTALK. Ces langages ont, en effet, la capacité d'exploiter des connaissances et sont également des langages symboliques ; c'est la raison pour laquelle on les utilise dans des applications d'intelligence artificielle. Mais on peut aussi les utiliser comme des langages de programmation ordinaires. Il faut alors se poser deux questions : le didacticiel a-t-il les capacités de l'enseignant qui ont été énoncées dans le paragraphe sur les tuteurs ? Aurait-on été capable de l'écrire en BASIC (ou avec un système d'auteur) ? Les réponses à ces questions permettent de faire facilement le tri entre les didacticiels intelligents et les autres.

Programme d'exploration

On appelle ainsi des systèmes ou des langages inspirés du courant LOGO, et qui facilitent l'exploration d'un domaine. Ce sont des instruments merveilleux d'apprentissage par l'action, dans lesquels l'apprenant

SYSTEMES EXPERTS ET ENSEIGNEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR

commande des dispositifs (par exemple la tortue, ou des objets de la vie courante modélisés souvent avec des langages à objets), et apprend en regardant les effets produits par ces commandes. Il n'existe pas d'expression unique pour désigner ces systèmes : on les appelle le plus souvent des «boîtes à outils», des «micromondes» ou des «environnements d'exploration». Ils ont souvent été développés dans des laboratoires d'intelligence artificielle. Appartiennent-ils pour autant à l'E.I.A.O. ? En général, l'intelligence est à l'extérieur, chez l'enseignant dont la présence est indispensable pour susciter des activités et les exploiter avec l'apprenant. Mais ils peuvent constituer d'excellents outils d'observation pour le chercheur en psychologie cognitive et ils pourront entrer dans l'E.I.A.O. si on leur adjoint aide, explication et guidage discret.

Divers

Dans cette catégorie, nous rangeons les outils de composition de textes, les logiciels de traitement d'idées, les environnements de communication (par exemple journaux, messageries, systèmes hypertextes), les bases de données et les tableurs électroniques.

Essai de synthèse

Dans ce qui suit, nous nous limitons à un sur-ensemble comportant les programmes tuteurs, les programmes d'exercices (parfois appelés exercices) et les programmes de simulation, et introduisons trois classes de didacticiels à «degré d'intelligence» croissant. Pour cela, on appellera étape une unité d'interaction entre le programme et l'apprenant, comprenant une restitution d'informations (facultative), une sollicitation, une acquisition de réponse et une réaction si le tuteur a la main, ou bien une requête et une réaction si c'est l'apprenant qui a la main [Barchechath 90].

La première classe est celle dans laquelle tout est prédéfini : nombre et contenus des étapes possibles, contenus attendus des réponses (l'ordinateur ne sait pas répondre aux questions qu'il pose) ou des requêtes, modalités de la transition d'une étape à une autre (écrites sous forme de conditions) : le programme se comporte comme un automate d'états fini, avec un point d'entrée, un point de sortie, des points d'arrêt-reprise éventuels. La facilité de programmation de fonctionnalités correspondant aux rôles de l'enseignant dépend de l'outil de médiatisation* : un langage de programmation impératif ou un système d'auteur convient parfaitement. Ce qui est difficile, c'est de modéliser sous forme impérative certains

comportements, et ce qui est rébarbatif, c'est de devoir les répéter pour chaque transition. C'est le cas, par exemple, pour une règle du type : *dès que l'apprenant a répondu correctement à cinq exercices du même niveau de difficulté, passer à un exercice de niveau supérieur.*

La seconde classe est celle dans laquelle les contenus, et par conséquent le nombre des étapes possibles, ne sont plus prédéfinis : on a introduit le hasard dans la machine (nombre aléatoire) ou chez l'apprenant (introduire une donnée a). Ce qui est prédéfini, c'est la forme de l'étape (par exemple : additionner deux nombres ou dessiner un carré de côté a). L'ordinateur sait donc répondre aux questions qu'il pose et comparer son résultat à celui de l'apprenant. Il peut aussi appliquer des règles fausses. Il est donc un peu intelligent, mais cette intelligence est purement algorithmique.

La troisième classe est celle dans laquelle l'intelligence n'est plus algorithmique. L'ordinateur ne pose plus des questions, il pose des problèmes dans lesquels il est souvent nécessaire de faire plusieurs pas de raisonnement ou dans lesquels l'apprenant a plusieurs choix possibles. Il n'est dès lors plus intéressant pour l'auteur de donner tous les exercices possibles avec pour chacun ses modes de résolution, corrects ou erronés : il vaut mieux donner à l'ordinateur l'ensemble des connaissances nécessaires et la façon de les utiliser. On est de plain-pied dans le domaine de l'intelligence artificielle. Il se trouve que très souvent cette connaissance s'exprime de façon déclarative, et non plus impérative, et nécessite des outils spécifiques, les outils de l'I.A. Et ce qui est intéressant, c'est que ce mode déclaratif est bien mieux adapté à des règles pédagogiques du type de celle que nous avons énoncée plus haut. L'ordinateur devient un expert, comme l'enseignant. Par conséquent, l'apprenant peut lui poser des questions ou lui soumettre ses propres problèmes. L'ensemble des étapes possibles devient donc, en théorie, infini.

I.1.B QUELQUES EXEMPLES TIRES DE DIFFERENTES DISCIPLINES

I.1.B.1 E.A.O. DES MATHÉMATIQUES

Le but de cette partie étant seulement de situer les deux monographies relatives à ARCHIMEDE et APLUSIX par rapport aux autres modes

SYSTEMES EXPERTS ET ENSEIGNEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR

d'utilisation de l'ordinateur dans l'enseignement des mathématiques, nous résumons l'étude complète présentée dans [OCD 87], illustrée par quelques exemples de didacticiels français examinés dans [Bénézra 89].

Buts de l'enseignement des mathématiques

Pourquoi enseigner les mathématiques ? Une première réponse, utilitaire, est que le but de cet enseignement est de donner les connaissances mathématiques pour vivre et travailler dans le monde d'aujourd'hui. Par exemple, à l'école élémentaire, «la capacité de lire les nombres et de compter, dire l'heure, payer ses achats et rendre la monnaie, peser et mesurer, comprendre des tableaux d'horaires simples, ainsi que des graphiques et des courbes simples, et d'effectuer tous les calculs nécessaires s'y rapportant». Pour beaucoup, le défaut de la réponse utilitaire est qu'elle est trop axée sur le contenu. En revanche, les mathématiques peuvent être considérées comme un moyen de mieux comprendre certains aspects du monde qui nous entoure. On pourrait remplacer l'expression «acquisition et utilisation de connaissances nouvelles» par l'expression «résolution de problèmes».

La question fondamentale est de savoir comment parvenir à la compétence en mathématiques. Depuis l'époque grecque, l'opinion qui veut que les mathématiques soient l'étude des nombres et de l'espace a eu une influence prépondérante sur l'enseignement de cette discipline. La théorie des ensembles et tout ce qui en a découlé ont bouleversé cette conception. Maintenant, on peut entrevoir pourquoi les mathématiques sont si difficiles à apprendre : elles supposent que l'être humain ait la capacité mentale de représenter les connaissances sur le monde à un niveau d'abstraction suffisamment élevé, et qu'il possède parallèlement une capacité de réflexion logico-déductive. Les études faites par les psychologues (Skinner, puis Gagné, Piaget, Case) sur l'apprentissage aident à définir ce que doit être l'enseignement des mathématiques : organiser des ensembles de conditions et d'activités qui permettront l'acquisition, par l'apprenant, de faits et de compétences, de structures conceptuelles, de méthodes et de stratégies générales dans le domaine mathématique : tous ces éléments sont nécessaires pour la résolution de problèmes. L'ordinateur apparaît donc comme un auxiliaire possible pour l'organisation de ces conditions et de ces activités.

Rôles pédagogiques de l'ordinateur

En mathématiques, un programme d'application comporte un algorithme qui résout une catégorie particulière de problèmes. Il peut être utilisé soit comme aide pour l'enseignant, soit comme aide pour l'apprenant. Le tableau noir électronique (par exemple, en France, les IMAGICIELS) et la calculatrice électronique sont des exemples de programmes d'application. Les programmes d'exercices sont, en mathématiques, de loin les plus nombreux. Ils peuvent notamment utiliser la capacité qu'a l'ordinateur de générer des nombres aléatoires et de faire des calculs pour vérifier l'exactitude de la réponse. Dans cette catégorie, la collection Maths A la Carte du CUEEP¹ propose un ensemble d'activités allant des niveaux 3 à 9 de la formation des adultes. Signalons l'importance que peuvent avoir les programmes d'exercices dans les activités de remédiation au collège (CALMENT, INVASION DES CHIFFRES).

Les tuteurs, répandus surtout aux Etats-Unis, exploitent pleinement les possibilités du graphique haute résolution et de la couleur pour accroître la motivation des apprenants, et ont souvent un caractère ludique. Dans le programme Bumble Games, un personnage de fiction donne des indices à mesure que les apprenants découvrent des concepts numériques, tels que supérieur à/inférieur à, nombres positifs/négatifs, colonnes/rangées, par le biais d'activités de déduction. Comme exemple de programme de simulation, nous citerons FOURMI, qui simule des modèles probabilistes de comportements de fourmis.

Un exemple de programme d'exploration est le programme EVE, développé il y a quelques années dans le cadre de l'expérience des 58 lycées, et dont le but était d'explorer un espace vectoriel fini pour découvrir les principaux concepts de ce type de structure algébrique. Aux Etats-Unis, ALGEBRALAND² est un environnement qui permet d'explorer la résolution des équations. L'idée de base est de garder en mémoire les transformations effectuées, de telle manière que celles-ci puissent être affichées, modifiées, annotées, voire refaites, fournissant ainsi une sorte d'animation du chemin

¹ Centre Universitaire d'Economie et d'Education Permanente, Université de Lille 1.

² J.S. Brown. *Process versus Product : a perspective on tools for communal and informal electronic learning*. Educational Computing Research Journal, n°1, 1985.

SYSTEMES EXPERTS ET ENSEIGNEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR

suivi vers la solution. SMALLTALK a servi de base à plusieurs expériences de modélisation d'univers mathématiques avec de jeunes enfants, notamment au Canada.

Enfin notons que les tableurs électroniques ont un rôle important à jouer dans la classe de mathématiques. Dans une approche «boîte noire», l'enseignant prépare les formules à l'avance, et l'apprenant introduit les données et obtient les résultats, d'une manière sensiblement analogue à l'utilisation d'un programme d'application. Dans une approche «boîte transparente», l'apprenant fournit à la fois les formules et les données.

L'E.I.A.O. des mathématiques

L'E.I.A.O. des mathématiques s'inscrit dans la problématique générale de l'E.I.A.O. : il s'agit de modéliser les connaissances et les connaissances pédagogiques d'un domaine et de concevoir des activités utilisant ces modèles pour enseigner ou faire découvrir une partie des connaissances du domaine en question. Les systèmes d'E.I.A.O. des mathématiques peuvent se caractériser selon leur type d'activité, qui fait distinguer les micro-mondes, les tuteurs et des systèmes intermédiaires. Le traitement des erreurs est une autre caractéristique qui les différencie.

Les micro-mondes sont des environnements dans lesquels l'apprenant agit sur un univers modélisé, conduit les expériences de son choix et construit ses connaissances à partir des résultats qu'il observe. En géométrie, LOGO et CABRI-GEOMETRE¹ sont des exemples de micro-mondes. Avec l'un comme avec l'autre, l'apprenant peut construire des figures géométriques et étudier leur propriétés. Leur approche est cependant très différente : LOGO construit des objets géométriques qui sont des traces de procédures ; CABRI-GEOMETRE possède un langage de manipulation d'objets géométriques permettant un travail plus proche de la géométrie classique ; il autorise aussi la déformation des figures (par exemple en déplaçant un point et en conservant les liens installés entre ce point et les autres objets). En algèbre, ALGEBRALAND est un exemple de micro-monde : l'apprenant peut choisir les problèmes à traiter et développer son propre arbre de raisonnement avec les opérateurs de son choix. Les micro-mondes ont leur intérêt et leurs limites. Ils s'appuient sur un modèle constructiviste de l'apprentissage qui

¹ Y. Baulac. *Un micro-monde de géométrie : CABRI-géomètre*. Thèse de l'Université de Grenoble I, 1990.

CONCLUSION

Si, du point de vue de l'adaptation aux apprenants et des capacités d'autonomie décisionnelle, les systèmes traditionnels présentent des limites conceptuelles et des marges de progression inférieures aux systèmes intelligents, ils représentent encore l'immense majorité des systèmes opérationnels et offrent des performances certaines. La distinction principale entre les deux approches réside dans le codage explicite de la connaissance qui justifie à la fois les capacités et les limites des systèmes traditionnels comme les espoirs placés dans les systèmes intelligents. Ainsi, les systèmes traditionnels offrent l'avantage d'être très généraux alors que les systèmes intelligents sont souvent dédiés à un domaine en raison de la structuration de la connaissance qui doit coller au domaine pour être efficace (sauf à multiplier les méta-niveaux de connaissances). L'extension à un nouveau domaine d'enseignement nécessite un travail important de réécriture de la base de connaissances, qui ne peut être effectué par n'importe quel auteur, mais ce travail est fait une fois pour toutes, le programme gérant alors les exercices et le contrôle de l'étudiant. Dans un système traditionnel, chaque exercice représente une réécriture, avec les risques de dérive et d'hétérogénéité inhérents. La maintenance d'une base de connaissances peut être facilitée par différents outils de contrôle de la cohérence, à la différence du graphe d'un exercice traditionnel, où la connaissance est très morcelée et mélange le domaine, le contrôle et la pédagogie. Du point de vue du comportement du système, il semble intéressant de laisser à l'étudiant le maximum de liberté dans ses choix, pour lui montrer ensuite quelles peuvent être les conséquences d'une mauvaise décision, ou mieux de le laisser prendre conscience seul des conséquences afin qu'il en tire lui-même les conclusions. Cela exige du système une grande souplesse et une certaine tolérance dans les demandes qui peuvent être sub-optimales. Or les systèmes traditionnels, qui se fondent sur des listes préétablies de comportements à chaque étape de résolution, ne peuvent guère prétendre à l'exhaustivité et leurs commentaires sont donc non pertinents ou hétérogènes. Enfin, dans le contexte de simulation qui est le plus intéressant, il est important d'interpréter correctement le comportement de l'étudiant et de juger de l'efficacité de la démarche. Dans les systèmes traditionnels, l'évaluation n'est efficace que si, là encore, toute la rigueur et l'exhaustivité possibles



sont apportées à la structuration de la démarche, à chaque étape, en raison de la diversité des comportements, en vue également de délivrer des réponses adéquates et non stéréotypées. Les systèmes intelligents ont le potentiel pour relever ce défi, à condition de rendre explicite leur propre démarche, d'avoir une représentation personnalisée de leur interlocuteur, de pouvoir gérer plusieurs stratégies, une pour la résolution de problème et une stratégie pédagogique, et enfin de pouvoir raisonner à différents niveaux d'abstraction.

