

2 m 11. 2836 e 2

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Étude et réalisation d'un agent pédagogique explicatif

Par :

Amal Zouaq

Département d'informatique et de recherche opérationnelle
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Maître ès Sciences (M.Sc.)
en informatique



Août, 2000

(c) Amal Zouaq, 2000

QA

76

U54

2001

15,002

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Étude et réalisation d'un agent pédagogique explicatif

Présenté par:

Amal Zouaq

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Président-rapporteur :

Nie Jian-Yun

Directeur de recherche :

Frasson Claude

Membre du jury :

Kropf Peter

Mémoire accepté le

23 novembre 2000

SOMMAIRE

Les STI¹ visent à dispenser un enseignement le plus personnalisé possible. Leur importance devient de plus en plus grande dans le cadre de l'éducation à distance. En effet, l'impact grandissant d'Internet dans la vie de tous les jours conduit à penser à ses avantages au niveau de l'enseignement, et plus précisément à son utilisation possible dans le domaine des STI. On imagine les bienfaits pouvant en découler : d'un côté une facilité d'accès au savoir, et une diffusion de la connaissance à un nombre quasi illimité de personnes, de l'autre un enseignement individualisé. C'est dans ce cadre que s'insère la recherche présentée dans ce mémoire, puisqu'elle fait partie d'un projet d'enseignement à distance, visant à faciliter la préparation de cours aux concepteurs, et à réaliser un STI pour l'enseignement à distance de ces cours. Notre recherche se focalise toutefois sur un concept clé dans les STI : les explications.

Qui, dans sa vie de tous les jours, n'a pas eu besoin d'une explication complémentaire ? Qui, un jour également, ne s'est pas dit : « je n'ai pas très bien compris l'explication » ? Nous avons tenté de répondre à ces questions en essayant de présenter des explications adaptées au profil des apprenants, lorsque ces derniers le demandent explicitement, ou lorsqu'ils se trouvent dans des situations de blocage. Nous avons également essayé d'analyser les raisons de l'incompréhension des explications lorsque cette incompréhension devient patente.

Pour ce faire, nous avons utilisé la technologie des agents intelligents en créant un agent pédagogique explicatif qui a pour tâche d'aider l'apprenant en lui présentant les

¹ Systèmes Tutoriels Intelligents

explications appropriées et d'analyser les raisons de ses incompréhensions au moyen de la théorie des graphes conceptuels.

Mots-clés

STI, Enseignement à distance, Explications, Agent pédagogique, Modèle de l'apprenant, Graphes conceptuels.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIERES.....	V
TABLE DES FIGURES	IX
REMERCIEMENTS.....	X
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 STI - EVOLUTION, DEFINITION ET COMPOSANTS.....	6
2.1 ÉVOLUTION DES SYSTÈMES TUTORIELS INTELLIGENTS	6
2.2 DÉFINITION DES SYSTÈMES TUTORIELS INTELLIGENTS.....	8
2.3 ARCHITECTURE DES SYSTÈMES TUTORIELS INTELLIGENTS	9
2.3.1 <i>Le module expert</i>	10
2.3.2 <i>Le module de l'apprenant</i>	11
2.3.2.1 Architectures du modèle de l'apprenant.....	12
2.3.2.1.1 Les modèles de recouvrement (overlay student models).....	12
2.3.2.1.2 Les modèles différentiels (differential student models).....	12
2.3.2.1.3 Les modèles de perturbation (perturbation student models).....	13
2.3.2.2 Initialisation du modèle de l'apprenant.....	14
2.3.3 <i>Le module pédagogique (le tuteur)</i>	15
2.3.4 <i>L'environnement d'enseignement</i>	16
2.3.5 <i>Le module interface</i>	17
2.4 UN STI COMME OUTIL D'ÉDUCATION À DISTANCE	17
2.4.1 <i>Les systèmes d'apprentissage hypermédia basés sur le Web</i>	18
2.4.2 <i>Les systèmes d'apprentissage adaptatifs basés sur le Web</i>	19
2.4.2.1 La planification du curriculum.....	20
2.4.2.2 L'analyse intelligente des réponses de l'apprenant.....	20
2.4.2.3 L'aide interactive à la résolution de problèmes.....	20
2.4.2.4 L'aide basée sur l'expérience passée de l'apprenant.....	21
2.4.2.5 L'aide à la collaboration adaptative.....	21
2.4.2.6 La présentation adaptative.....	21
2.4.2.7 La navigation adaptative.....	21
2.5 CONCLUSION	22
CHAPITRE 3 LES EXPLICATIONS.....	24
3.1 DÉFINITION DU CONCEPT EXPLICATION	24
3.2 IMPORTANCE DES EXPLICATIONS DANS UN SYSTÈME À BASE DE CONNAISSANCES.....	25
3.3 DÉFINITION DES CONNAISSANCES NÉCESSAIRES À UN SYSTÈME EXPLICATIF	26
3.4 BUT DES EXPLICATIONS [BÉLANGER <i>ET AL.</i> , 99].....	27
3.5 TYPOLOGIE DES SYSTÈMES EXPLICATIFS	28
3.6 MÉTHODES DE GÉNÉRATION DES EXPLICATIONS.....	28
3.6.1 <i>L'approche de génération statique</i>	29
3.6.2 <i>L'approche dynamique</i>	30
3.6.2.1 Des explications basées sur les règles (paraphrase de règles).....	30

3.6.2.2	Utilisation de méta-règles.....	31
3.6.2.3	Les explications basées sur les tâches.....	32
3.6.2.4	Le modèle EES (The Explainable Expert System Framework).....	33
3.6.2.5	Un modèle basé sur la reconstruction d'explications.....	33
3.6.2.6	Autres approches.....	34
3.7	TECHNIQUES D'ADAPTATION DES EXPLICATIONS À L'USAGER.....	34
3.7.1	<i>Adaptation du niveau de détail.....</i>	34
3.7.2	<i>Adaptation du type d'information présenté.....</i>	35
3.7.3	<i>Adaptation en fonction des connaissances de l'utilisateur.....</i>	35
3.7.4	<i>Adaptation en fonction des buts de l'utilisateur.....</i>	35
3.7.5	<i>Adaptation aux tâches de l'utilisateur [Höök, 95].....</i>	36
3.8	CONCLUSION.....	36
CHAPITRE 4 L'APPROCHE AGENT DANS LES STI.....		38
4.1	INTRODUCTION AUX AGENTS PÉDAGOGIQUES.....	39
4.1.1	<i>Définition des agents pédagogiques.....</i>	39
4.1.2	<i>Petit historique.....</i>	39
4.1.3	<i>Propriétés des agents pédagogiques.....</i>	40
4.1.3.1	L'autonomie.....	40
4.1.3.2	La connaissance du domaine et des tâches des apprenants.....	41
4.1.3.3	La crédibilité.....	41
4.1.4	<i>Types d'interactions.....</i>	41
4.1.4.1	Choix du type d'interface avec l'apprenant.....	41
4.1.4.2	Interaction au moyen de conseils.....	42
4.1.4.3	Interaction au moyen de questions.....	42
4.1.4.4	Interaction au moyen de démonstrations.....	42
4.2	REVUE DE L'ART DES AGENTS PÉDAGOGIQUES.....	43
4.2.1	<i>Projet développé à l'USC (University of Southern California) -Steve (Soar Training Expert for Virtual Environment).....</i>	43
4.2.1.1	Présentation du projet.....	43
4.2.1.2	Personnification de l'agent.....	43
4.2.1.3	Représentation du modèle de l'apprenant.....	43
4.2.1.4	Types d'interactions avec l'apprenant.....	43
4.2.2	<i>Projet développé à l'USC (University of Southern California) -Adele (Agent for Distance Learning Environments).....</i>	44
4.2.2.1	Présentation du projet.....	44
4.2.2.2	Personnification de l'agent.....	44
4.2.2.3	Représentation du modèle de l'apprenant.....	45
4.2.2.4	Types d'interactions avec l'apprenant.....	45
4.2.3	<i>Projet développé à NCSU (North Carolina State University) -«Herman the bug».....</i>	46
4.2.3.1	Présentation du projet.....	46
4.2.3.2	Personnification de l'agent.....	46
4.2.3.3	Représentation du modèle de l'apprenant.....	46
4.2.3.4	Types d'interactions avec l'apprenant.....	47
4.2.4	<i>Projet développé à NCSU (North Carolina State University) -Cosmo.....</i>	48
4.2.4.1	Présentation du projet.....	48
4.2.4.2	Personnification de l'agent.....	48
4.2.4.3	Représentation du modèle de l'apprenant.....	48
4.2.4.4	Types d'interactions avec l'apprenant.....	49
4.2.5	<i>Projet développé au DFKI (German Research Center For Artificial Intelligence GmbH): PPP Persona (Personalized Plan Based Presenter).....</i>	49
4.2.5.1	Présentation du projet.....	49
4.2.5.2	Personnification de l'agent.....	49
4.2.5.3	Représentation du modèle de l'apprenant.....	49
4.2.5.4	Types d'interactions avec l'apprenant.....	50
4.2.6	<i>Projet développé à UWF (University of West Florida): The Giant.....</i>	50
4.2.6.1	Présentation du projet.....	50
4.2.6.2	Personnification de l'agent.....	51
4.2.6.3	Représentation du modèle de l'apprenant.....	51

4.2.6.4	Types d'interactions avec l'apprenant.....	51
4.2.7	<i>Projet développé à "The MITRE Corporation": L'agent pédagogique OWL : (Organization-Wide Learning)</i>	52
4.2.7.1	Présentation du projet.....	52
4.2.7.2	Personnification de l'agent.....	52
4.2.7.3	Représentation du modèle de l'apprenant.....	52
4.2.7.4	Types d'interactions avec l'apprenant.....	52
4.2.8	<i>Projet développé à CHI Systems, Inc. : Un agent dans l'aéronautique</i>	53
4.2.8.1	Présentation du projet.....	53
4.2.8.2	Personnification de l'agent.....	53
4.2.8.3	Représentation du modèle de l'apprenant.....	53
4.2.8.4	Types d'interactions avec l'apprenant.....	54
4.3	APPORT DES AGENTS PÉDAGOGIQUES À NOTRE PROJET.....	54
4.3.1	<i>Type de l'interface avec l'apprenant</i>	54
4.3.2	<i>Types d'interactions avec l'apprenant</i>	55
4.3.3	<i>Représentation d'un modèle de l'apprenant</i>	55
4.3.4	<i>Personnification de l'agent</i>	56
4.3.5	<i>Autres apports</i>	56
4.4	CONCLUSION.....	56
CHAPITRE 5 PRINCIPES ET IMPLANTATION.....		58
5.1	INTRODUCTION.....	58
5.2	ARCHITECTURE GLOBALE DU SYSTÈME.....	59
5.3	L'ENVIRONNEMENT D'ÉDITION.....	61
5.3.1	<i>Structuration d'un cours</i>	61
5.3.2	<i>Typologie des exercices</i>	61
5.3.3	<i>Création d'explications</i>	63
5.3.4	<i>Réutilisation des connaissances</i>	63
5.3.5	<i>Composants de l'environnement d'édition</i>	64
5.3.5.1	Le modèle du domaine.....	64
5.3.5.2	Le serveur d'agents.....	64
5.3.5.3	Le modèle de l'apprenant.....	64
5.3.5.4	L'éditeur d'explications.....	65
5.3.5.5	La base de connaissance.....	66
5.3.5.6	Le processus de recommandations.....	66
5.4	L'ENVIRONNEMENT D'APPRENTISSAGE.....	66
5.4.1	<i>Le module expert</i>	67
5.4.2	<i>Le modèle de l'apprenant</i>	67
5.4.3	<i>L'environnement d'enseignement</i>	68
5.4.4	<i>Le module interface</i>	69
5.4.5	<i>Le module pédagogique</i>	70
5.4.5.1	L'agent planificateur.....	70
5.4.5.2	L'agent modèle de l'apprenant.....	71
5.4.5.3	L'agent explicatif.....	71
5.5	L'AGENT EXPLICATIF.....	73
5.5.1	<i>Contexte et but</i>	73
5.5.2	<i>Caractéristiques de l'agent explicatif</i>	75
5.5.2.1	La réactivité.....	75
5.5.2.2	La mobilité.....	75
5.5.2.3	L'autonomie.....	75
5.5.2.4	L'apprentissage et la déduction.....	75
5.5.2.5	La crédibilité.....	76
5.5.3	<i>Architecture de l'agent explicatif</i>	77
5.5.3.1	La couche de perception.....	77
5.5.3.2	La couche explicative.....	77
5.5.3.3	La couche d'apprentissage.....	80
5.6	LES EXPLICATIONS.....	81
5.6.1	<i>Principes généraux</i>	81

5.6.2	<i>Présentation des explications</i>	82
5.6.3	<i>Qualité des explications</i>	83
5.6.4	<i>Structuration des explications</i>	84
5.6.4.1	Les représentations logiques	84
5.6.4.2	Les représentations procédurales.....	84
5.6.4.3	Les représentations basées sur les réseaux	84
5.6.4.4	Les représentations structurées.....	85
5.6.4.5	Introduction aux graphes conceptuels	85
5.6.5	<i>Outils fournis au concepteur</i>	86
5.6.5.1	L'éditeur de concepts.....	86
5.6.5.2	L'éditeur de liens sémantiques.....	87
5.6.5.3	L'outil de visualisation de graphes conceptuels.....	89
5.6.6	<i>Outil fourni à l'apprenant</i>	90
5.7	DÉTERMINATION DE LA QUALITÉ DES EXPLICATIONS PRÉSENTÉES	91
5.8	DÉTERMINATION DES ERREURS-TYPES	92
5.9	DÉTECTION DES POINTS D'INCOMPRÉHENSION DANS UNE EXPLICATION	93
5.9.1	<i>Principe de l'algorithme d'apprentissage</i>	93
5.9.2	<i>Appariement des graphes conceptuels</i>	93
5.9.3	<i>Affichage des résultats de l'algorithme d'apprentissage</i>	94
5.9.4	<i>Présentation de conseils au concepteur</i>	97
CHAPITRE 6 EXPÉRIMENTATION ET DIRECTIONS FUTURES		100
6.1	EXPÉRIMENTATION DE L'ÉDITION DE COURS	100
6.1.1	<i>Convivialité de l'interface</i>	100
6.1.2	<i>Rapidité de création et de mise à jour des cours</i>	100
6.1.3	<i>Utilité des différents types d'exercices</i>	101
6.1.4	<i>Compréhension et utilité des graphes conceptuels</i>	101
6.1.5	<i>Facilité d'utilisation du logiciel</i>	102
6.1.6	<i>Utilité des déductions de l'agent explicatif</i>	102
6.1.7	<i>Suggestions</i>	102
6.2	EXPÉRIMENTATION DU STI	102
6.2.1	<i>Convivialité de l'interface et facilité d'utilisation</i>	103
6.2.2	<i>Utilité des explications</i>	103
6.2.3	<i>Pertinence de la personnification de l'agent</i>	104
6.2.4	<i>Facilité d'utilisation des graphes conceptuels</i>	104
6.2.5	<i>Suggestions</i>	104
6.3	DIRECTIONS FUTURES.....	105
6.3.1	<i>Apport d'une aide</i>	105
6.3.2	<i>Amélioration de l'interface</i>	105
6.3.3	<i>Personnification de l'agent en trois dimension</i>	105
6.3.4	<i>Création d'une typologie des explications</i>	106
6.3.5	<i>Création de graphes conceptuels sous forme d'exercices</i>	106
6.3.6	<i>Sollicitation de l'agent</i>	106
6.3.7	<i>Traitement des relations n-adiques dans les graphes conceptuels</i>	106
6.3.8	<i>Recherche dynamique d'explications équivalentes</i>	107
6.3.9	<i>Amélioration de l'extraction de concepts</i>	107
CHAPITRE 7 CONCLUSION		108
BIBLIOGRAPHIE		112
ANNEXE A QUESTIONNAIRE SOUMIS AUX CONCEPTEURS DE COURS		126
ANNEXE B QUESTIONNAIRE SOUMIS AUX APPRENANTS		127

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : ARCHITECTURE D'UN SYSTÈME CAI [URL9]	7
FIGURE 2 : COMPOSANTS D'UN STI [BURNS ET CAPPS, 88]	10
FIGURE 3 : ILLUSTRATION D'UN MODÈLE DE RECOUVREMENT [URL1]	12
FIGURE 4 : ILLUSTRATION D'UN MODÈLE DIFFÉRENTIEL [URL2]	13
FIGURE 5 : ILLUSTRATION D'UN MODÈLE DE PERTURBATION [URL3]	14
FIGURE 6 : ARCHITECTURE DU SYSTÈME TUTORIEL INTELLIGENT	60
FIGURE 7 : ÉDITEUR DE PROBLÈMES À ÉTAPES	63
FIGURE 8 : ÉDITEUR D'EXPLICATIONS.....	66
FIGURE 9 : PRÉSENTATEUR DE PROBLÈMES À ÉTAPES	70
FIGURE 10 : INTERFACE DE L'AGENT EXPLICATIF.....	72
FIGURE 11 : ARCHITECTURE DE L'AGENT EXPLICATIF.....	77
FIGURE 12 : L'AGENT EXPLICATIF NE PEUT PRÉSENTER D'EXPLICATIONS	78
FIGURE 13 : PRÉSENTATION DES CAUSES D'ERREUR PAR L'AGENT EXPLICATIF	79
FIGURE 14 : PRÉSENTATION DE L'EXPLICATION SUITE À LA SÉLECTION DE L'APPRENANT.....	80
FIGURE 15 : RÉPÉTITION DANS LA PRÉSENTATION D'UNE EXPLICATION	80
FIGURE 16 : EXEMPLE DE GRAPHE CONCEPTUEL	85
FIGURE 17 : ÉDITEUR DE CONCEPTS	87
FIGURE 18 : ÉDITEUR DE LIENS SÉMANTIQUES	88
FIGURE 19 : OUTIL DE VISUALISATION DE GRAPHE CONCEPTUELS.....	89
FIGURE 20 : ÉDITEUR DE GRAPHE CONCEPTUELS (POUR L'APPRENANT)	90
FIGURE 21 : PRÉSENTATION DES BONNES EXPLICATIONS AU CONCEPTEUR	91
FIGURE 22 : PRÉSENTATION DES MAUVAISES EXPLICATIONS AU CONCEPTEUR	91
FIGURE 23 : PRÉSENTATION DE NOUVELLES ERREURS TYPES AU CONCEPTEUR (DANS LES PROBLÈMES À ÉTAPES).....	92
FIGURE 24 : PRÉSENTATION DES DÉDUCTIONS DE L'AGENT SOUS FORME DE GRAPHE CONCEPTUELS (GRAPHE COMPLET).....	95
FIGURE 25 : PRÉSENTATION DES DÉDUCTIONS DE L'AGENT SOUS FORME DE GRAPHE CONCEPTUELS (LIENS ERRONÉS)	96
FIGURE 26 : PRÉSENTATION DES DÉDUCTIONS DE L'AGENT SOUS FORME DE GRAPHE CONCEPTUELS (LIENS MANQUANTS)	96
FIGURE 27 : PRÉSENTATION D'UNE STATISTIQUE LIÉE À UN CONCEPT DONNÉ.....	98
FIGURE 28 : PRÉSENTATION DU RÉSUMÉ DES CONSEILS LIÉS AU GRAPHE CONCEPTUEL.....	98

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Monsieur Claude Frasson, pour son appui inconditionnel tout au long de ma recherche, pour son aide intellectuelle, ainsi que pour son soutien financier.

Je tiens également à remercier Monsieur Khalid Rouane, dont les conseils m'ont été particulièrement précieux.

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

A l'origine, lorsque le concept d'école fut créé, l'enseignement était limité à un modèle quasi rigide : un enseignant dispensant son savoir à des élèves de manière unilatérale. Il s'agissait d'une approche directive, le flux d'information allant du professeur vers les apprenants, considérés comme de passifs réceptacles d'information. Ce modèle supposait des heures de cours fixes, une attention soutenue pendant de longues périodes (ce modèle étant encore de mise actuellement, bien que la capacité limitée de l'humain à se concentrer trop longtemps ait été prouvée), un contenu de cours également fixé à l'avance. Bref, l'ensemble des caractéristiques liées au processus d'enseignement dit traditionnel. Toutefois, au fil du temps, une évolution s'est faite vers un enseignement plus démocratique, où la discussion était favorisée, les choix autorisés (de sujets de discussions, de cours), l'esprit critique encouragé, cette évolution étant incontestablement liée au développement, développement économique, social et culturel. Il n'est ainsi pas faux de formuler, qu'en ce jour, en l'an 2000, il existe encore de nombreux pays où le modèle d'enseignement dit traditionnel prévaut, signe parmi d'autres de leur retard de développement.

L'informatique ayant principalement évolué dans les pays développés, on peut sans crainte énoncer que les méthodes d'enseignement évoluant dans la société humaine ont également influencé l'enseignement informatisé (c'est-à-dire l'enseignement via l'utilisation d'un logiciel). Cela, bien sûr, s'accompagnant des progrès technologiques allant de pair avec tout développement, en l'occurrence la technologie Internet, la

technologie des agents intelligents, et les recherches réalisées dans le domaine des STI, tous ces domaines étant étroitement liés aux objectifs de ce mémoire.

En effet, très rapidement, l'éducation s'est révélée être une application majeure de l'informatique. Utiliser cette science pour comprendre le raisonnement cognitif humain, détecter les stratégies d'enseignement utiles, détecter les modes de raisonnement, définir des catégories d'utilisateurs, ou encore remplacer et/ou améliorer l'enseignement humain (dans les classes), s'est révélé être le but ultime de nombre de chercheurs, objectif qui a conduit à l'émergence des systèmes tutoriels intelligents.

Que les enseignant(e)s se rassurent, lorsque nous parlons de remplacer l'enseignement humain, il va sans dire que le but n'est pas de faire disparaître les enseignant(e)s (!), mais d'utiliser un STI lorsque cet «enseignement humain» semble impossible, en raison par exemple de contraintes d'ordre géographiques ou autres...

En effet, et ainsi que nous l'avons évoqué un peu plus haut, l'essor d'Internet additionné aux potentialités des STI en font un outil intéressant d'éducation à distance. L'un des avantages des STI est de pouvoir être utilisé n'importe où, n'importe quand, à condition de disposer du matériel informatique adéquat. Dans ce contexte, un STI pourrait permettre un accès rapide et généralisé au savoir, réalisant ainsi une sorte d'éducation de masse... Cette dernière assertion est d'autant plus vraie de nos jours avec le coût amoindri des équipements informatiques, et la généralisation de l'utilisation d'Internet. Cette influence grandissante d'Internet dans notre vie de tous les jours en général, et dans l'enseignement en particulier a donné lieu à la création de STI basés sur le Web, utilisant ce dernier soit pour servir d'outil d'enseignement à part entière (c'est dans ce cadre que le client, en l'occurrence l'apprenant, effectue toutes ses opérations uniquement à partir de son navigateur), soit de manière ponctuelle (c'est-à-dire en utilisant les ressources du Web, mais pas uniquement via un navigateur).

Par ailleurs, une nouvelle technologie a vu le jour ces dernières années : la technologie des agents intelligents.

Un agent intelligent peut être brièvement défini comme une entité logicielle autonome, pouvant percevoir son environnement, ayant des objectifs propres, et effectuant des actions selon un raisonnement ou une planification. Un ensemble de caractéristiques permettent généralement de définir un agent intelligent. Nous nous étendrons plus en détail sur ces différents points dans notre mémoire.

La technologie des agents intelligents a grandement influencé le domaine des STI, en ce sens qu'elle a permis de substituer aux différents modules constituant les STI un ou plusieurs agents. Ces substitutions ont rendu les différents composants encore plus indépendants les uns des autres, avec une plus grande richesse de fonctions, ce qui a permis d'évoluer vers des environnements d'enseignement entièrement basés sur des architectures d'agents.

La raison d'être des STI de façon générale, et des agents pédagogiques en particulier, est d'apporter une assistance effective aux apprenants durant leurs sessions d'apprentissage.

Dans ce contexte, diverses problématiques se posent :

- de façon générale, l'apport d'une **assistance efficace** ne semble pas encore atteint dans le cadre des STI existants;
- l'apport d'une assistance à un apprenant peut se traduire par la présentation d'**explications**. La méthode de génération et le choix de ces explications représente un second problème car il est difficile de les adapter spécifiquement à un apprenant;
- une troisième problématique s'impose à nous : généralement, lorsque les STI enregistrent de mauvaises performances (c'est-à-dire que l'apprenant ne comprend pas), on pense que ces mauvaises performances sont surtout liées à des questions de stratégies pédagogiques ou d'évaluation du niveau des apprenants qui se sont avérées inadéquates. Un problème important réside dans le fait qu'il est difficile de savoir si une explication s'est révélée inefficace, et a donc contribué à ces mauvaises performances ;
- ce n'est qu'après plusieurs résultats que le STI peut se rendre compte de cette inefficacité. Or il est encore plus complexe de connaître les raisons ou encore les points précis de l'incompréhension qui en a résulté. Ceci constitue donc une quatrième problématique.

Notre objectif dans ce mémoire est de tenter de répondre à ces problématiques :

- en apportant une aide à l'apprenant au moyen d'explications plus efficaces;
- en évaluant les méthodes de génération des explications existantes, et en choisissant celle qui convient le mieux à l'apprenant;
- en tentant de définir un index de qualité des explications;
- en essayant de détecter les points d'incompréhension dans les explications ayant un faible index de qualité.

Notre méthode pour contribuer à la solution de ces problèmes repose sur le recours à des agents intelligents capables de détecter les incompréhensions à travers des graphes conceptuels qui représentent les explications. Notre agent possède également les moyens d'associer des explications à des causes potentielles d'erreurs.

Afin de déployer cette méthode, notre étude s'appuie sur une analyse :

- des composants des STI et de leur évolution jusqu'à nos jours (Chapitre 2) ;
- de la notion d'explication et d'une partie des problématiques liées aux explications (Chapitre 3);
- des projets réalisés dans le domaine des agents pédagogiques (agents dédiés à l'enseignement), étude devant ensuite nous servir à positionner notre travail et à effectuer des comparaisons en terme de similarités et divergences (Chapitre 4);

L'apport de ces différents domaines à notre travail est expliqué plus spécifiquement dans le chapitre « Principes et implantation » (Chapitre 5), qui décrit l'environnement global dans lequel évolue l'**agent pédagogique explicatif**, en focalisant sur l'architecture, les caractéristiques et fonctions de ce dernier.

Le chapitre « Expérimentation et directions futures » (Chapitre 6) se propose de faire état des tests réalisés sur notre système, ainsi que des conclusions que nous avons tirées suite à ces résultats.

Enfin, une conclusion (Chapitre 7) vient clore la présente recherche en illustrant les forces et faiblesses de notre système, mais surtout les directions futures possibles.

Notre recherche a été présentée dans la conférence ITS'2000 [Zouaq,2000a] et dans deux rapports internes de Virtuel-Âge International Inc. [[Zouaq,2000b][Zouaq,2000c]].

Dans la suite de ce mémoire et pour des raisons de simplicité, nous désignerons l'agent pédagogique explicatif sous le vocable « agent explicatif ».

CHAPITRE 2 STI - EVOLUTION, DEFINITION ET COMPOSANTS

2.1 Évolution des systèmes tutoriels intelligents

Les systèmes tutoriels intelligents n'ont pas toujours existé sous la forme que nous leur connaissons aujourd'hui. Ils ont subi de multiples évolutions, ces dernières étant liées aussi bien aux résultats des STI expérimentaux qu'aux découvertes en psychologie cognitive et théories de l'éducation.

L'idée de systèmes d'apprentissage automatisés remonte au début des années soixante (1960), avec les espoirs suscités par le domaine de l'intelligence artificielle, et les besoins d'éducation de masse soulevés au lendemain de la seconde guerre mondiale. Il semblait alors logique d'utiliser le domaine émergent de l'informatique pour faire face à ces besoins, d'où tout d'abord d'idée de l'apprentissage assisté par ordinateur ou CAI². Les premiers programmes exploitant cette idée étaient génératifs, c'est-à-dire qu'ils généraient des problèmes à présenter aux apprenants dans des domaines spécifiques. Il s'agissait essentiellement de systèmes présentant un problème à l'apprenant, enregistrant la réponse de ce dernier, et mettant à jour sa performance en fonction du résultat. Ces systèmes ne tenaient pas compte de la manière d'apprendre des élèves, ils les considéraient plutôt comme des réceptacles d'information, information qu'ils devaient assimiler quelque soit la manière dont elle leur était présentée (pensée behavioriste). La figure 1 présente la structure d'un système CAI :

² Computer Assisted Instruction

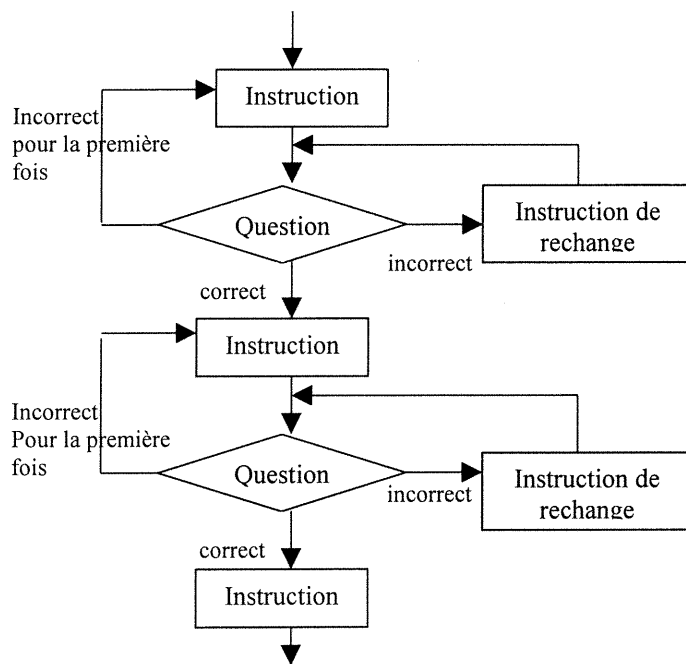


Figure 1 : Architecture d'un système CAI [URL9]

Vers la fin des années 1960 et au début des années 1970, les chercheurs ont commencé à considérer l'apprenant comme un facteur majeur dans le processus d'instruction. Aussi, plusieurs programmes ont-ils été développés, avec une modification de l'instruction à présenter basée sur l'historique des réponses de l'apprenant. Par ailleurs, les réponses de l'apprenant devaient être anticipées afin de déterminer quelle information le système devait présenter. C'est ainsi qu'une première modélisation de l'apprenant est apparue. Toutefois, cette modélisation se basait essentiellement sur les comportements des apprenants, et non sur leurs niveaux de connaissance.

Le terme Système Tutoriel Intelligent est apparu en 1982, lors de la revue de l'état de l'art effectuée par Sleeman et Brown [Sleeman et Brown, 82]. Ces derniers tentaient en effet, de distinguer entre les systèmes CAI, et des systèmes évolutifs, plus perfectionnés, d'où l'émergence d'une nouvelle appellation.

C'est également à cette époque qu'est apparu le terme « modèle de l'apprenant » pour décrire la représentation abstraite d'un apprenant au sein d'un programme informatique.

C'est aussi au milieu des années 1980 que John Anderson a développé la théorie cognitive ACT (Adaptive Control of Thought), théorie qui a grandement contribué au développement des STI. Les principes de cette théorie ont été appliqués dans deux célèbres systèmes informatiques : the Geometry tutor [Anderson *et al.*, 86][Anderson *et al.*, 85a] et LISP Tutor [Anderson et Reiser,85b]. La célébrité de ces systèmes est liée en partie au fait que leur utilisation n'a pas été qu'expérimentale, mais a donné lieu à des évaluations réelles.

C'est également dans cette période que des systèmes experts, dédiés à des domaines précis, ont été développés.

Actuellement, le domaine des STI semble être influencé par deux technologies majeures : la technologie des agents intelligents (qui sera introduite dans le chapitre 4) et la technologie Internet/Web (dont nous discuterons un peu plus loin).

Nous avons jusqu'à maintenant parlé des évolutions ayant existé dans les STI, et s'il est indubitable que la notion de STI soit claire, il pourrait être intéressant de la définir de manière formelle.

2.2 Définition des systèmes tutoriels intelligents

Selon Murray [Murray, 99], les STI sont des systèmes d'enseignement informatiques qui possèdent un contenu sous forme de base de connaissance (qui spécifie ce qui doit être enseigné), des stratégies d'enseignement (qui spécifient la manière d'enseigner ce contenu) ainsi qu'une connaissance sur le niveau de l'apprenant dans le contenu, afin d'adapter dynamiquement leur enseignement.

De manière générale, les STI sont des systèmes à base de connaissances dédiés à l'enseignement et à la formation.

Les principaux inconvénients reliés aux premiers systèmes d'enseignement assisté par ordinateur résidaient dans un manque d'expertise pédagogique, dans la linéarité de présentation du contenu à enseigner, sans aucune échappatoire possible, et dans un modèle de l'apprenant plus que primitif, pour ne pas dire inexistant. Les STI, plus évolués, sont donc venus pallier à ces faiblesses, en s'articulant autour d'une architecture de base, qui est demeurée inchangée jusqu'à nos jours, même si l'importance et le poids des différents modules qui la constituent varient d'un système à l'autre.

Nous allons maintenant décrire cette architecture de base.

2.3 Architecture des systèmes tutoriels intelligents

De manière générale, les STI se composent de cinq modules principaux ([Burns et Capps, 88] :

- le module expert : ce module fournit la connaissance du domaine, qui représente la connaissance de l'expert ;
- le module de l'apprenant : ce module retrace la compréhension ou non, par l'apprenant, de la connaissance du domaine ;
- le module pédagogique : ce module contient les stratégies pédagogiques d'enseignement. Ces stratégies doivent être adaptées au module de l'apprenant sans aucune intervention du tuteur humain ;
- l'environnement d'enseignement : c'est l'environnement dans lequel l'apprenant effectue son apprentissage ;
- l'interface : c'est la partie visible du STI, au travers de laquelle l'apprenant dialogue avec ce dernier.

La figure 2 montre les différents composants d'un STI.

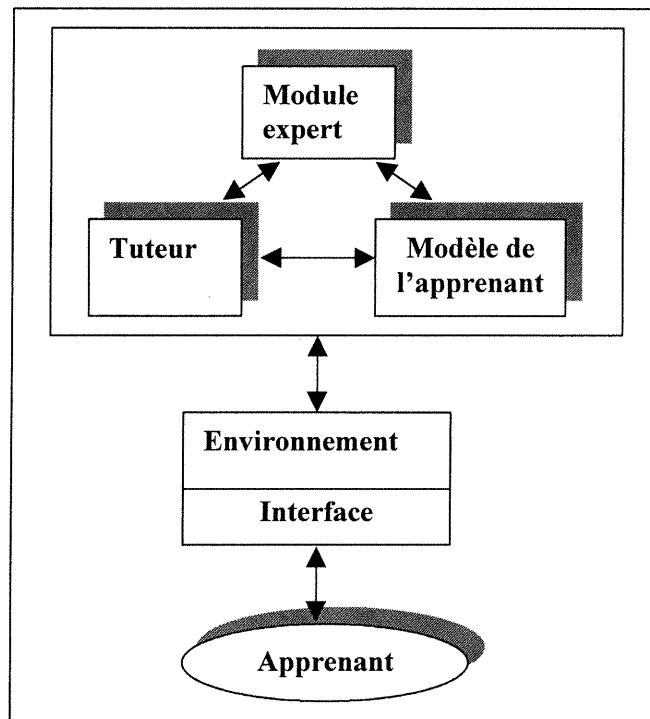


Figure 2 : Composants d'un STI [Burns et Capps, 88]

2.3.1 Le module expert

C'est le module qui regroupe toute la connaissance nécessaire au processus d'enseignement, connaissance modélisée de manière à doter le système d'un degré maximum d'intelligence. En effet, la connaissance seule ne peut être suffisante. Comme tout bon professeur, un module expert doit aussi posséder un savoir-faire, c'est-à-dire une expertise sur la manière de résoudre les problèmes.

Il apparaît donc clairement l'importance de la modélisation des connaissances dans un système expert. Un ensemble de stratégies ont été utilisées pour la représentation de la connaissance dans la base de connaissances [Anderson, 88] :

- la représentation en logique de premier ordre
- la représentation en règles de production (les règles «si ... alors»)
- la représentation en réseaux sémantiques
- la représentation en « frames » et « schémas »

Au travers de leur évolution, les STI se sont de plus en plus focalisés sur le modèle de l'apprenant. C'est en effet un composant clé des STI, et il doit permettre d'avoir la représentation la plus précise possible sur les connaissances de l'apprenant. Cette exigence est cependant minimale (bien que déjà énorme en terme de défis !), si l'on considère tout ce qui constitue un être humain : ses goûts et préférences, son caractère, son degré d'intelligence, son mode de raisonnement, son humeur, mais aussi son passé en terme de connaissances et d'expériences. Impossible ? si l'on considère ne serait-ce que l'apprentissage et les rapports humains, il est indubitable que toute cette connaissance de l'être ne peut être prise en compte. Nous nous devons toutefois de tendre vers ce modèle idéal, et d'essayer autant que possible de s'en rapprocher. C'est pourquoi de nombreuses recherches sont orientées aujourd'hui vers des critères autres que la connaissance, comme les préférences (d'affichages, de types d'exercices, de mode de représentation,...) ou encore les humeurs et émotions de l'apprenant [Abou-Jaoude *et al.*, 99].

Dans les prochaines sections, nous allons présenter les différentes techniques de modélisation des connaissances de l'apprenant.

2.3.2 Le module de l'apprenant

Ce module permet d'identifier, pour un apprenant, son niveau courant de compréhension du domaine de connaissance. Selon McCalla et Greer [McCalla et Greer, 91], l'implantation du modèle de l'apprenant est essentielle à l'adaptation du système d'apprentissage aux besoins des apprenants.

VanLehn [VanLehn, 1988] décrit les différences ou les similarités entre le modèle expert et le modèle de l'apprenant en terme de conceptions erronées ou de conceptions manquantes. Les conceptions manquantes peuvent être décrites comme des conceptions possédées par l'expert mais pas par l'apprenant, tandis que les conceptions erronées sont des connaissances (fausses) possédées par l'apprenant, mais pas par l'expert.

C'est sur la base de ces conceptions erronées et/ou manquantes que plusieurs architectures du modèle de l'apprenant ont été proposées.

2.3.2.1 Architectures du modèle de l'apprenant

2.3.2.1.1 Les modèles de recouvrement (*overlay student models*)

Dans ces modèles, les connaissances de l'apprenant sont considérées comme étant un sous-ensemble des connaissances de l'expert, et le but de l'enseignement est d'élargir ce sous-ensemble, de manière à arriver idéalement à couvrir l'ensemble des connaissances de l'expert. La figure 3 illustre cette idée.

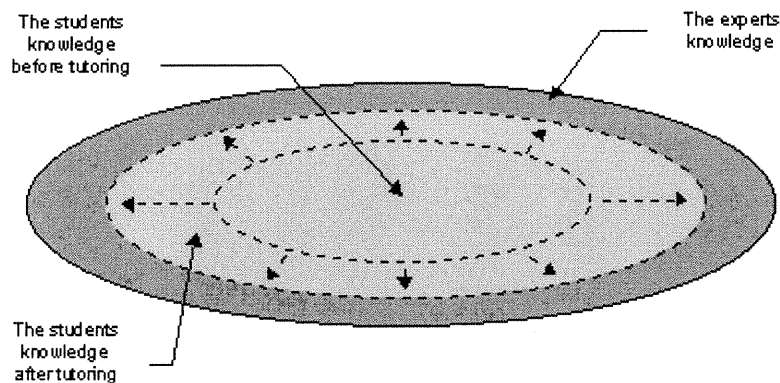


Figure 3 : illustration d'un modèle de recouvrement [URL1]

Ce type de modèle part de la supposition que l'apprenant ne peut pas acquérir une connaissance que l'expert ne possède pas. L'un des inconvénients de ce modèle est qu'il ne considère pas les incompréhensions que l'enseignement peut avoir suscitées. Par ailleurs, il n'existe aucun mécanisme permettant de différencier entre la connaissance que l'apprenant n'a pas encore engrangée, malgré sa présentation, et la connaissance qui ne lui a pas encore été présentée. Le modèle suivant permet de remédier à cet inconvénient. L'un des exemples typiques de STI dans ce cas de figure est le célèbre STI Guidon [Clancey, 83].

2.3.2.1.2 Les modèles différentiels (*differential student models*)

Le modèle différentiel est une extension du modèle de recouvrement dans le sens où la connaissance est divisée en deux ensembles distincts :

- la connaissance que l'apprenant est censé connaître à un moment donné ;
- la connaissance qui n'a pas encore été présentée à l'apprenant ;

La figure 4 montre ce découpage de la connaissance. Un modèle de recouvrement peut ainsi être appliqué à la connaissance déjà présentée à l'apprenant. Toutefois, tout comme le modèle de recouvrement, le modèle différentiel ne tient pas compte des conceptions erronées de l'apprenant (misconceptions/bugs).

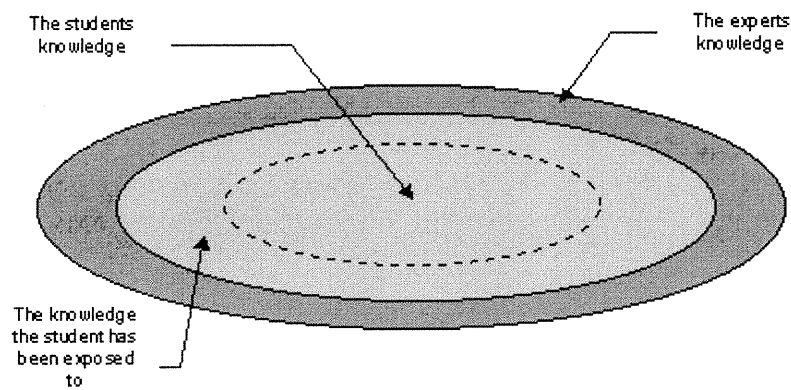


Figure 4 : illustration d'un modèle différentiel [URL2]

2.3.2.1.3 Les modèles de perturbation (*perturbation student models*)

Ce type de modèle retrace, ainsi qu'indiqué dans la figure 5, la connaissance de l'apprenant qui n'appartient pas au domaine de connaissance de l'expert, autrement dit, ses conceptions erronées.

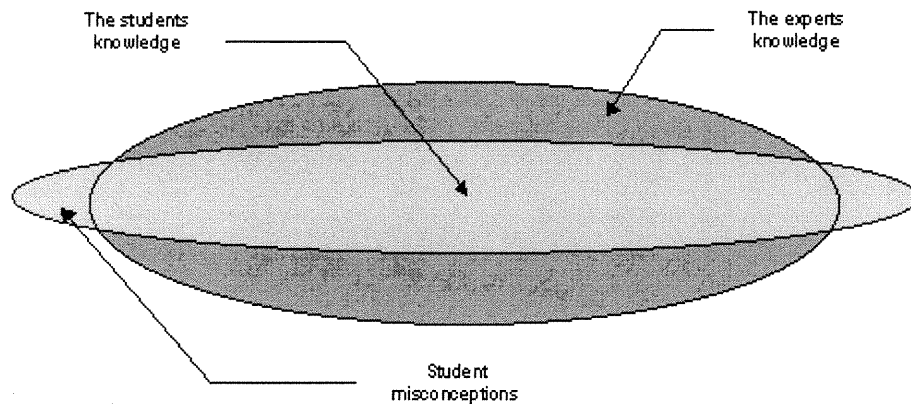


Figure 5 : illustration d'un modèle de perturbation [URL3]

Le modèle des perturbations ajoute à la connaissance de l'expert une librairie de conceptions erronées (bug library). Le processus utilisé pour la création d'une telle librairie peut être énumératif ou génératif. Dans le premier cas, il s'agit de lister l'ensemble des conceptions erronées possibles suite à une analyse du problème et des erreurs fréquemment commises par les apprenants. Dans le second cas, il s'agit de générer des conceptions erronées à partir d'une théorie cognitive donnée.

Dans ce type de modèle, le but est d'augmenter les connaissances de l'apprenant, tout en éliminant ses conceptions erronées.

La section suivante va traiter des techniques d'initialisation du modèle de l'apprenant.

2.3.2.2 Initialisation du modèle de l'apprenant

Ainsi que mentionné par Dufort [Dufort, 99], l'initialisation du modèle de l'apprenant peut être réalisée de différentes manières, mais deux procédures sont fréquemment usitées :

- l'initialisation par valeurs préalables, qui implique que les valeurs dans le système sont soit vides, soit initialisées à des valeurs par défaut (si l'on possède une connaissance préalable des apprenants devant utiliser le système) ;
- l'initialisation par prétest, qui consiste en un test que doit passer l'apprenant visant à recueillir le maximum d'informations possibles sur ses connaissances du domaine, ces informations devant ensuite servir à l'initialisation du modèle de l'apprenant.

Si l'enseignement semble pouvoir être plus personnalisé dans la seconde approche, il n'en demeure pas moins que celle-ci peut se révéler très lourde et peut-être non efficace, puisqu'on ne saurait poser des questions sur toutes les connaissances possibles et imaginables dans le système.

Par ailleurs, la compréhension d'un individu et sa connaissance ne peuvent être cernées au moyen d'un simple et unique test. C'est tout un cheminement dans un processus d'enseignement qui peut nous permettre de déduire si globalement, un apprenant a «compris» ce que l'on était censés lui enseigner, cette compréhension n'excluant pas d'ailleurs des zones d'ombre, qui ne sauraient être détectées même dans un enseignement dit traditionnel (humain-humain).

Ainsi que mentionné un peu plus haut, d'autres approches existent comme l'approche bayésienne [VanLehn, 96] ou l'approche par prétest intelligent, par catégorisation, etc. [Dufort, 99].

Nous allons maintenant présenter le module pédagogique.

2.3.3 Le module pédagogique (le tuteur)

Ce module sert à trois fonctions principales [Halff, 88] :

- il contrôle la présentation du contenu à l'apprenant ;
- il doit être capable de répondre aux questions de l'apprenant ;
- il doit pouvoir déterminer quand les apprenants ont besoin d'aide et quel type d'aide leur prodiguer.

Toute stratégie pédagogique doit être basée sur des principes pédagogiques et psychologiques formels. Les besoins de l'apprenant doivent être identifiés, et pris en compte dans la stratégie d'enseignement. Par ailleurs, un ensemble de points doivent être pris en considération par le système [URL11] :

- l'apprenant doit pouvoir demander de l'aide lorsqu'il se trouve dans une situation de blocage. Le système doit alors pouvoir lui prodiguer les conseils adéquats ;
- l'assistance peut être fournie en cours de résolution de problèmes, justement pour éviter des situations de blocage ;
- l'apprenant doit pouvoir revoir son processus de résolution de problème. Si cela est permis en cours de résolution, il doit pouvoir corriger ses erreurs ;
- le STI peut avoir un comportement réactif, en demandant à l'apprenant de justifier ses décisions ;
- le système peut présenter des modèles de réponses à l'apprenant afin que celui-ci puisse s'en inspirer ;
- le système peut prodiguer des conseils à l'apprenant, et réagir positivement (encouragements, félicitations), ou négativement (avertissements) aux réponses de l'apprenant.

2.3.4 L'environnement d'enseignement

La notion d'enseignement, lorsqu'il est informatisé, induit plus qu'une simple présentation du cours à l'apprenant. Un tuteur effectif doit normalement superviser les progrès de l'apprenant et fournir une assistance lorsque cela est requis explicitement ou implicitement. Cette supervision de l'apprenant se fait à travers un environnement d'enseignement. Celui-ci permet à l'apprenant de suivre un cours tout au long d'une session d'apprentissage et de demander de l'aide au besoin. Selon Burton [Burton, 88], l'environnement d'apprentissage définit le type de problèmes que l'apprenant doit résoudre ainsi que les outils disponibles nécessaires à cette résolution.

2.3.5 Le module interface

De façon générale, l'interface d'un STI doit être conviviale et modélisée de façon à ne pas poser des problèmes de compréhension supplémentaires à l'apprenant. Cette interface doit donc être transparente, c'est-à-dire qu'elle doit véhiculer des concepts familiers à l'apprenant. L'interaction humain-machine dans les STI est particulièrement complexe car les usagers de ces systèmes travaillent par définition avec des concepts qu'ils ne maîtrisent pas bien. Dans ce contexte, une interface incorrectement modélisée peut remettre en cause tout le processus d'enseignement. Selon Miller [Miller, 88], il est important de tenir compte de deux aspects fondamentaux pour créer une interface de STI. En premier lieu, l'interface doit permettre un enseignement clair et direct. En second lieu, elle doit faciliter l'interaction de l'apprenant avec le domaine enseigné, en tenant compte de la manière dont ce dernier conceptualise ce domaine.

Nous avons précédemment parlé de l'importance grandissante de la technologie Internet/Web dans le domaine des STI. En effet, nous pensons que ces derniers sont appelés à jouer un rôle important dans le domaine de l'éducation à distance basée sur le Web. Nous allons donc retracer le développement de cette dernière, en soulignant la place qu'occupent les STI dans cette évolution.

2.4 Un STI comme outil d'éducation à distance

Traditionnellement, les STI ont été construits et déployés en utilisant des médiums de communication statiques comme les CD-ROM. Il existe de nombreux avantages liés à cette approche, comme le fait d'utiliser un nombre important d'outils multimédia sans avoir à tenir compte des retards dus aux réseaux, ou sans tenir compte de sites Web devenus non disponibles. De nombreux inconvénients sont toutefois reliés à ce type de médium. En effet, tout changement effectué sur les cours à enseigner, ou sur le logiciel, implique une distribution de nouveaux CD-ROM, ce qui est coûteux en terme de temps et de ressources financières. Il importait donc de trouver une nouvelle solution.

Le Web apparaît comme une alternative possible. En effet, les possibilités qu'il offre sont importantes en terme d'apprentissage car :

- il permet une facilité de distribution à une échelle internationale (ce ne sont pas les cours qui sont distribués aux apprenants, mais les apprenants qui s'inscrivent à des cours et les visualisent à travers leur navigateur) ;
- un grand nombre d'apprenants peuvent être atteints, car toutes les personnes connectées au Web peuvent être ciblées ;
- il permet une facilité de mise à jour, sans même que les apprenants aient à en être avisés. En effet, les apprenants n'ont qu'à se connecter sur le site où le cours est enseigné, une mise à jour du contenu d'enseignement aussi bien que de l'application d'enseignement (STI) se fait de façon transparente pour eux ;

C'est dans ce contexte que l'on parle d'éducation à distance basée sur le Web.

L'éducation à distance basée sur le Web est d'ailleurs un sujet de recherche et de développement actuel très prisé. Les avantages de cette éducation à distance dans son sens le plus strict (en utilisant un navigateur) sont clairs : une indépendance d'apprentissage et une indépendance de plate-forme. L'éducation à distance basée sur le Web a connu plusieurs évolutions, elle s'est tout d'abord caractérisée par le passage de systèmes d'apprentissage statiques à des systèmes d'apprentissage adaptatifs.

Nous allons détailler cette évolution dans les prochaines sections.

2.4.1 Les systèmes d'apprentissage hypermédia basés sur le Web

Les premiers cours basés sur le Web étaient en général représentés par un réseau de pages Web statiques, basées sur une représentation «hypertexte». Dans un document hypertexte, l'information est stockée sous forme de nœuds et de liens entre ces nœuds. La sélection de l'un de ces liens permet de naviguer vers d'autres pages dans le document ou même vers d'autres documents. Un système hypermédia est une extension de ce principe qui intègre des éléments multimédia comme une animation, une vidéo ou un son dans un document. De nombreux avantages sont reliés à l'hypertexte, comme la facilité de navigation vers l'avant ou l'arrière, la facilité d'extension de l'information contenue dans le document, la grande flexibilité dans la structuration du document, etc.

Ces quelques avantages étant cités, il ne peut nous échapper toutefois qu'un système hypertexte est un système non linéaire, non séquentiel, où l'utilisateur peut naviguer à son gré, ce qui comporte certes des avantages, mais peut aussi entraîner une certaine désorientation de l'utilisateur et une trop grande quantité d'information à traiter. Cette désorientation peut se traduire par :

- des utilisateurs ne sachant pas où se diriger ;
- des utilisateurs sachant où aller, mais ne sachant pas comment y aller ;
- des utilisateurs ignorant où ils se situent dans la structure de l'information ;

Une surcharge d'information survient lorsque l'utilisateur est enfoui sous de multiples détails, qui le distraient de son objectif d'apprentissage ou d'information principal.

Ces problèmes ont été étudiés et ont conduit à des améliorations concrétisées par la notion d'adaptation (Hypertext adaptation). C'est cette notion qui a conduit au second type de systèmes, présenté dans le point suivant.

2.4.2 Les systèmes d'apprentissage adaptatifs basés sur le Web

Ainsi que nous l'avons fait remarquer, un grand nombre d'applications d'enseignement à distance se basent sur la présentation d'un contenu statique. La création de systèmes d'apprentissage pouvant offrir un certain degré d'interaction et d'adaptabilité représente un défi bien plus grand car la notion d'adaptabilité est complexe.

L'adaptabilité est importante pour les systèmes d'apprentissage basés sur le Web à plus d'un titre : en premier lieu, les applications basées sur le Web sont normalement utilisées par une plus grande variété d'utilisateurs. Ensuite, du fait que l'utilisateur est seul face à son ordinateur, il n'a pas le loisir de disposer de l'assistance normalement offerte lors d'un apprentissage dit «traditionnel».

Différentes techniques ont été utilisées pour produire des systèmes d'apprentissage adaptatifs basés sur le Web [URL6]. Ces techniques se sont inspirées aussi bien du domaine des STI (la planification du curriculum, l'analyse intelligente des solutions de l'apprenant, l'aide à la résolution de problèmes de manière interactive ou basée sur des exemples, l'aide à la collaboration) que du domaine de l'hypermédia adaptatif (adaptation

de navigation et adaptation de présentation). Nous allons décrire chacune de ces techniques.

2.4.2.1 La planification du curriculum

Le but de *la planification du curriculum* est de fournir à l'apprenant une séquence d'unités de connaissance à maîtriser et de tâches à accomplir, cette séquence lui étant adaptée et représentant la séquence optimale. On parle de «knowledge sequencing» ou de «task sequencing» [Brusilovsky,92]. Cette technologie est très importante dans le cadre de l'apprentissage basé sur le Web, car elle permet de guider l'apprenant dans l'espace d'information. La planification du curriculum a été implantée sous différentes formes dans les systèmes basés sur le Web suivants : ELM-ART [Brusilovsky *et al.*, 96], CALAT [Nakabayashi *et al.*, 97], InterBook [Brusilovsky et Schwarz, 97b], AST [Specht *et al.*, 97], MANIC [Stern *et al.*, 97], Medtec [Eliot *et al.*, 97], DCG [Vassileva, 97].

2.4.2.2 L'analyse intelligente des réponses de l'apprenant

L'analyse intelligente des réponses de l'apprenant permet quant à elle de détecter ce qui est faux ou incomplet dans la connaissance de l'apprenant, et donc de fournir une réponse «intelligente» à l'apprenant de manière interactive. Nous pouvons citer deux systèmes qui implantent une analyse intelligente des réponses de l'apprenant, et ce de manière adaptative : ELM-ART, un STI de programmation en LISP [Brusilovsky *et al.*, 96] et WITS, un STI pour les calculs différentiels [Okazaki *et al.*, 96][Okazaki *et al.*, 97].

2.4.2.3 L'aide interactive à la résolution de problèmes

L'aide interactive à la résolution de problèmes permet de fournir à l'apprenant une aide intelligente à chaque étape de résolution, allant d'un simple conseil à l'exécution de la prochaine étape à la place de l'apprenant. Les systèmes implantant cette technique peuvent observer les actions de l'apprenant, les comprendre, et utilisent cette compréhension pour fournir de l'assistance et mettre à jour le modèle de l'apprenant.

Il existe au moins quatre systèmes qui ont implanté cette technique : PAT-Online [Brusilovsky *et al.*, 97c], Belvedere [Suthers et Jones, 97], ADIS [Warendorf et Tan, 97] et D3-WWW-Trainer [Faulhaber et Reinhardt, 97].

2.4.2.4 L'aide basée sur l'expérience passée de l'apprenant

Un autre type d'aide, basé sur l'*expérience passée de l'apprenant*, peut également être utilisé. Les apprenants résolvent des problèmes en s'aidant d'exemples provenant de leur expérience passée. Dans ce contexte, le rôle du STI est de suggérer aux apprenants les cas qui semblent les plus appropriés. Le système ELM-ART utilise cette technique [Brusilovsky *et al.*, 96].

2.4.2.5 L'aide à la collaboration adaptative

L'*aide à la collaboration adaptative* permet de trouver des comportements communs entre différents usagers. Des exemples seraient de former, à un moment donné, des groupes pour la résolution de problèmes [Hoppe, 95] [Ikeda *et al.*, 97], ou de trouver la personne la plus compétente pour répondre à une question donnée. On imagine les opportunités offertes par cette technique sur le Web.

2.4.2.6 La présentation adaptative

Le rôle de la *présentation adaptative* est d'adapter le contenu d'une page hypermédia aux buts de l'apprenant, au niveau de connaissance et autres informations stockés dans son profil d'apprenant. Dans un système implantant une présentation adaptative, les pages ne sont pas statiques mais générées ou assemblées de manière adaptative. Les systèmes suivants utilisent cette technique : C-Book [Kay et Kummerfeld, 94], un cours adaptatif sur Hypertext [Calvi et De Bra, 97], Medtec [Eliot *et al.*, 97], ELM-ART [Brusilovsky *et al.*, 96], AST [Specht *et al.*, 97] et InterBook [Brusilovsky et Schwarz, 97b].

2.4.2.7 La navigation adaptative

Le rôle de la *navigation adaptative* est de permettre l'orientation de l'apprenant dans l'espace de navigation. En particulier, le système peut trier, annoter, ou cacher partiellement les liens d'une page afin de faciliter le choix du prochain lien. Cela peut pallier au problème de désorientation de l'utilisateur.

L'approche la plus populaire de navigation adaptative est l'annotation (annoter les liens d'une page par des commentaires). Cette dernière est implantée dans ELM-ART

[Brusilovsky *et al.*, 96], InterBook [Brusilovsky et Schwarz, 97b], WEST-KBNS [Brusilovsky *et al.*, 97a] et AST [Specht *et al.*, 97].

2.5 Conclusion

Nous pouvons synthétiser le contenu de ce chapitre par les points suivants :

- nous avons souligné les principales étapes dans l'évolution des STI ;
- nous avons défini les STI et nous avons décrit les différents composants de base de leur architecture ;
- nous avons parlé des potentialités des STI comme outils d'éducation à distance;
- l'évolution de systèmes d'apprentissage statiques à des systèmes d'apprentissage adaptatifs a également été évoquée, en détaillant les techniques permettant de réaliser cette adaptation.

Dans notre recherche, notre but est d'utiliser une partie de ces techniques pour favoriser la compréhension de l'apprenant :

- la planification du curriculum nous permettra de guider le processus d'enseignement ;
- l'analyse intelligente des réponses de l'apprenant nous permettra d'adapter les interactions du STI au modèle de l'apprenant ;
- l'aide interactive à la résolution de problèmes permettra de pallier aux blocages potentiels de l'apprenant.

Par ailleurs, nous avons décrit l'utilisation d'un navigateur (browser) comme outil d'éducation à distance (comme dans le cas d'un STI sous forme d'applet par exemple). On peut toutefois également imaginer un STI se présentant sous forme d'une application à télécharger et à installer sur la machine de l'apprenant, utilisant le Web comme dispensateur du contenu de l'enseignement (utilisation de pages Web comme contenu d'enseignement) et l'Internet comme médium de communication permettant l'acheminement d'agents faisant office d'enseignants virtuels.

C'est l'approche que nous voulons adopter et que nous expliciterons dans le chapitre 5 « Principes et Implantation ».

Par ailleurs, nous pensons qu'un ensemble de choix conceptuels peuvent être retenus du domaine des STI :

- du fait de l'importance de la modélisation des connaissances dans un STI, notre objectif, dans ce projet, est d'adopter une structure de connaissances proche de celle que nous connaissons dans l'enseignement dit traditionnel (chapitres, sections, sous-sections, etc.). Nous pensons qu'elle a pour avantage d'être communément acceptée par la majorité des apprenants, puisque connue.
- l'utilisation d'un modèle de perturbation comme modèle de l'apprenant nous paraît appropriée. En effet, ce modèle nous semble être le modèle le plus évolué, puisqu'il permet de représenter :
 1. les connaissances maîtrisées par l'apprenant ;
 2. les connaissances erronées de l'apprenant ;
 3. les connaissances non encore présentées à l'apprenant ;
- enfin, au niveau de l'initialisation du modèle de l'apprenant, nous comptons utiliser une approche se situant entre l'approche par valeurs préalables et l'initialisation par prétest intelligent. En effet, nous pensons que notre système doit effectivement travailler avec des valeurs préalables, mais que ces dernières doivent lui être fournies par l'apprenant. Toutefois, elles ne doivent pas, selon nous, être fournies au moyen d'un prétest intelligent car un test reste toujours limité. Aussi pensons-nous simplement interroger l'apprenant sur le niveau qu'il pense avoir dans les unités de connaissances qui lui seront présentées dans le cours. Ces valeurs préalables seront ensuite modifiées au fur et à mesure du processus d'enseignement.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons le thème des explications. En effet, le but de notre recherche est d'apporter une aide efficace aux apprenants sous forme d'explications. Aussi devons-nous définir ce que nous entendons par explication, et faire un survol de la typologie des systèmes explicatifs et des techniques qu'ils utilisent.

CHAPITRE 3 LES EXPLICATIONS

De plus en plus, le concept d'explication se révèle être un concept clé permettant d'assurer le succès de tous les logiciels, dans les domaines d'application les plus divers. Il est donc nécessaire d'explorer ce concept et d'essayer de cerner ce qu'il désigne, comment il peut être appliqué ou implanté, suivant quelles techniques et surtout à quelles fins.

3.1 Définition du concept explication

Une explication peut être définie comme étant de l'information donnant un sens ou une interprétation à un phénomène, ou permettant de le rendre compréhensible.

Selon Cawsey [Cawsey, 95], le terme explication revêt différentes significations selon les personnes. En effet, certaines d'entre elles pensent immédiatement à la notion scientifique de l'explication, où un raisonnement est donné pour une observation quelconque, parfois inattendue. D'autres considèrent une explication comme étant simplement une information qui élucide ou éclaircit quelque chose qui n'était pas clair.

D'autres peuvent encore utiliser ce terme pour référer à un dialogue complexe où les besoins d'information sont déterminés et satisfaits et où les participants parviennent à une compréhension commune. Cawsey note également que dans les systèmes experts, la notion d'explication est différente, mais tout aussi diversifiée. La notion dite traditionnelle, basé sur la recherche sur MYCIN [Buchanan et Shortliffe, 84], réfère à des

réponses aux questions comment et pourquoi, et est basée sur la trace de raisonnement du système. Les questions «comment» sont interprétées comme voulant dire : «comment êtes-vous parvenu à cette conclusion?», alors que les questions «pourquoi» sont interprétées comme voulant dire «pourquoi avez-vous posé cette question?». Ce courant assume que le rôle principal d'une explication est d'éclaircir et de justifier le raisonnement du système expert. Certains travaux sur les explications ont été réalisés sur ce principe, en fournissant de meilleures réponses basées sur une trace de résolution de problèmes plus détaillée, ou en utilisant l'information sur l'utilisateur pour améliorer les explications. D'autres ont plutôt étudié le problème de l'explication comme étant séparé du domaine des systèmes experts, et se sont focalisés sur la manière de communiquer une information complexe.

De façon générale, un mécanisme d'explication est un module qui doit être intégré dans tous les logiciels, et à plus forte raison, dans les logiciels d'éducation et d'enseignement.

3.2 Importance des explications dans un système à base de connaissances

Les explications fournies par un système à base de connaissances sont importantes à plusieurs titres [Haton *et al.*, 91]:

- pour la mise au point du système grâce à l'aide apportée à la détection d'erreurs dans les connaissances et les stratégies de raisonnement ;
- comme outil pédagogique permettant à une personne de mieux s'approprier les méthodes de raisonnement et les comportements d'un certain domaine d'activité ;
- pour faciliter l'acceptation d'un système par ses utilisateurs potentiels.

3.3 Définition des connaissances nécessaires à un système explicatif

Un système explicatif doit être capable à la fois de résoudre des problèmes et d'expliquer son raisonnement. Pour atteindre ces objectifs, il doit disposer au moins de trois sortes de connaissances :

- en premier lieu, des connaissances du domaine d'application ;
- en second lieu, des connaissances explicatives permettant de comprendre son raisonnement pour ensuite rendre compte des résultats obtenus ;
- en troisième lieu, des connaissances de contrôle pour gérer les différentes étapes de résolution de problèmes. Les connaissances de contrôle doivent être soit indépendantes du domaine, soit spécifiques au domaine d'application.

Pour appliquer le système explicatif à un domaine particulier, l'expert doit fournir les connaissances nécessaires à la résolution d'un problème et au contrôle de cette résolution. La connaissance spécifique du domaine comporte un modèle conceptuel et un modèle de raisonnement.

- le modèle conceptuel contient les définitions des concepts manipulés, et des propriétés et relations qui caractérisent ces concepts ;
- le modèle du raisonnement comprend les connaissances permettant de déduire les informations à partir des informations existantes (règles) ainsi que des connaissances pour utiliser les connaissances, autrement dit, le savoir-faire sur la stratégie de résolution à adopter.

Le système explicatif doit également posséder des connaissances explicatives et des connaissances de contrôle indépendantes du domaine d'application.

- les connaissances explicatives doivent permettre d'interpréter la question posée par l'utilisateur et d'y répondre, c'est-à-dire qu'elles doivent permettre de déterminer le contenu et la structure de l'explication correspondante ;
- les connaissances de contrôle s'occupent de la gestion des tâches que le système doit accomplir pour résoudre les problèmes qui lui sont soumis.

3.4 But des explications [Bélanger *et al.*, 99]

De façon générale, le but à atteindre pour les systèmes explicatifs est de clarifier autant que possible une information ou situation, compte tenu de l'utilisateur auquel ils s'adressent. L'explication est complète lorsque l'utilisateur est satisfait et comprend **effectivement** le concept expliqué.

Plus particulièrement, un ensemble de buts peuvent être reliés aux explications, en fonction du rôle qu'elles doivent remplir :

- **Aide au diagnostic** : les explications sont généralement des déductions faites à partir des symptômes vers les conclusions. Il peut s'agir de diagnostic médical, mécanique, électronique, ...
- **Aide à la prédiction** : les explications peuvent être à la fois des déductions de conséquences probables à partir de situations données ou des inductions visant à généraliser un phénomène. On peut citer par exemple des prévisions militaires, météorologiques, etc.
- **Aide à l'interprétation** : il s'agit de donner les raisons de certaines configurations ou situations provenant de systèmes complexes comme la reconnaissance de la parole, l'analyse d'images ou de textes ou encore l'interprétation de signaux.
- **Aide à la planification** : il s'agit d'expliquer l'ordre d'une séquence d'actions dans différents domaines tels que la planification de projets, l'acheminement de marchandises, etc.
- **Aide à la surveillance et au contrôle** : il s'agit d'expliquer les changements de comportement d'un système, comme le contrôle aérien par exemple.
- **Aide à la réparation** : il s'agit ici de pouvoir expliquer le choix d'un remède plutôt qu'un autre afin de corriger un mauvais fonctionnement. Différents critères peuvent être considérés pour justifier ce choix, comme le coût de la réparation, les ressources impliquées, etc.
- **Aide à la formation** : il s'agit de trouver les stratégies qui conviennent à l'apprenant en considérant non seulement son niveau de connaissance sur le sujet d'apprentissage,

mais encore son style et ses critères affectifs. Le rythme des explications et leur granularité sont fonctions de ces critères, l'important étant de présenter l'explication au bon moment, de façon graduelle ou globale.

Dans le cadre du présent projet, nous nous intéressons principalement à cette dernière finalité.

Suivant le but des systèmes explicatifs, on peut dégager une typologie globale des systèmes explicatifs.

3.5 Typologie des systèmes explicatifs

De manière générale, on peut diviser les systèmes utilisant un mécanisme explicatif en deux grands ensembles :

- les systèmes expliquant leur propre démarche, dans lesquels se situent les systèmes justificatifs (qui permettent d'assurer l'utilisateur de la validité des résultats qui lui sont présentés), les systèmes experts, ou les systèmes d'aide à la décision ;
- les systèmes d'aide dans lesquels se situent aussi bien les systèmes d'aide généraux (utilisés pour décrire la manière dont un usager doit utiliser un produit ou une commande spécifiques) que les systèmes de formation comme les STI.

Les systèmes explicatifs utilisent diverses méthodes de génération des explications. C'est ce que nous allons présenter dans la section suivante.

3.6 Méthodes de génération des explications

Selon Herrmann et son équipe [Herrmann *et al.*, 98], deux démarches de génération peuvent être adoptées :

- la génération des explications peut être statique;
- la génération des explications peut être dynamique.

3.6.1 L'approche de génération statique

L'approche statique permet de proposer à l'utilisateur des explications ayant un format fixe, et permet de stocker ces explications dans le système. Cette approche a plusieurs avantages : elle simplifie les tâches de collection, de structuration et de génération des explications, et par là, elle se révèle moins coûteuse. Il s'agit donc d'imaginer toutes les questions possibles, ou tous les points requérant une aide, et de stocker l'information pouvant apporter une réponse à l'usager. La tâche du système est essentiellement de présenter de manière adéquate ces explications, c'est-à-dire de les présenter de manière à ce qu'elles soient adaptées au profil de l'utilisateur. La manière dont elles sont stockées, et leur typologie peut aider à effectuer une présentation efficace. Cependant, l'inconvénient majeur de cette approche est son manque de flexibilité.

Nous pouvons évoquer une technique utilisée dans la génération statique : la technique « Canned text » [URL7] permet de chercher la définition associée à un mot clé.

L'avantage de cette technique est la simplicité du concept aussi bien que de l'implantation. En plus des systèmes d'index traditionnels, certains outils logiciels comme l'hypertext peuvent être utilisés pour améliorer la recherche via des liens vers d'autres concepts.

Cette technique a toutefois des limitations :

- en premier lieu, un grand nombre de concepts clés doivent être associés aux messages présentés à l'utilisateur ;
- ensuite, tous ces messages doivent être établis à l'avance, aussi le concepteur doit-il anticiper à l'avance toutes les questions qu'un utilisateur peut poser ;
- enfin, l'explication ne suit pas nécessairement la logique du contexte, ce qui fait qu'elle n'est pas rattachée au contexte.

L'approche dynamique pallie au manque de flexibilité de l'approche statique, et permet de générer des explications suivant le contexte et le profil des utilisateurs. Toutefois, elle

se distingue par sa complexité et par un coût élevé de gestion et de développement des explications.

3.6.2 L'approche dynamique

La génération dynamique des explications est un domaine de recherche exploré déjà depuis au moins un quart de siècle [[Davis, 76][Shortliffe, 76][Swartout, 77a][Swartout, 77b][Winograd, 71]], particulièrement dans les systèmes experts.

Nous allons tenter de détailler les différentes techniques explicatives.

3.6.2.1 Des explications basées sur les règles (paraphrase de règles)

Les premiers systèmes explicatifs basaient leurs explications directement sur les règles qu'ils utilisaient dans leur résolution de problèmes, ainsi que sur leurs traces d'exécution. Ces systèmes produisaient leurs explications en paraphrasant les règles ou traces d'exécution en langage naturel. Pour que cette approche puisse marcher, les termes utilisés dans les règles devaient être compris par l'utilisateur.

De plus, les règles elles-mêmes devaient suivre des lignes de raisonnement familières à l'utilisateur [Swartout et Moore, 93]. L'un des avantages principaux de cette approche était sans nul doute sa simplicité : lorsque le système (système expert généralement) travaillait, un travail additionnel très minime devait être accompli pour produire des explications. Toutefois, un ensemble d'inconvénients accompagnent cette méthode : l'utilisation d'une représentation (les règles) à un trop bas niveau ne permet pas de capturer toute l'information nécessaire à l'explication, ni de distinguer les rôles que les différents types de connaissances peuvent jouer. Par ailleurs, le comportement global du système et ses lignes de raisonnement ne peuvent être retracés, l'utilisateur n'a donc qu'un point de vue «local » de l'action du système.

Le système MYCIN [Shortliffe, 76] est à l'origine de cette technique.

L'utilisation de méta-connaissances est une technique plus sophistiquée.

3.6.2.2 Utilisation de méta-règles

Cette technique a été développée par Clancey dans NEOMYCIN [Clancey, 86]. En effet, en analysant MYCIN, Clancey a noté que le système accomplissait différentes phases d'exécution ou tâches, en fournissant un diagnostic. Ces tâches étaient implicites, la structure des règles utilisées ne supportant pas leur représentation explicite.

NEOMYCIN a rendu ces tâches plus explicites en modifiant l'architecture basée sur les règles de plusieurs manières. En premier lieu, les règles qui effectuaient un traitement associé à une tâche particulière étaient groupées sous un ensemble de règles (ruleset). Les règles incluses dans un «ruleset» accomplissaient ensemble la tâche associée à ce «ruleset». Les règles dans un «ruleset» pouvaient seulement être déclenchées si le «ruleset» était actif. Les métarègles étaient utilisées pour exercer un contrôle sur les «rulesets» en les activant. Par ailleurs, ces métarègles pouvaient recommander des règles de domaines spécifiques à appliquer ou des résultats à demander à l'utilisateur.

La contribution majeure de NEOMYCIN a été **une meilleure abstraction de la connaissance de contrôle**. Le groupement des règles dans des ensembles reliés à des tâches spécifiques a permis de s'abstraire des règles particulières et de fournir une représentation explicite des étapes principales de traitement dans le système expert, ainsi que du cheminement suivi. Aussi, NEOMYCIN a-t-il pu offrir de meilleures explications sur la stratégie globale du système.

Toutefois, parce que l'architecture de NEOMYCIN était toujours basée sur les règles, les inconvénients de la première méthode se retrouvaient au sein d'un «ruleset». Par ailleurs, le problème de justification des actions du système n'était pas réglé dans NEOMYCIN, c'est-à-dire qu'il ne montrait pas comment une action particulière pouvait être justifiée par la connaissance des faits du domaine et des stratégies de résolution.

La notion d'abstraction a été encore plus approfondie dans le modèle des explications basées sur les tâches (tâches génériques).

3.6.2.3 Les explications basées sur les tâches

Les explications liées aux tâches permettent de lier une explication à des modules individuels du système expert [Tanner, 95]. Cela permet d'utiliser une approche hiérarchique dans la création des explications, et permet d'apporter des modifications à une partie du système sans pour autant affecter le reste des composants. Chaque module peut utiliser les meilleures techniques ou combinaisons de techniques pour générer des explications efficaces, cette pratique encourageant des techniques hybrides dans tout le système. Cela permet également au concepteur de structurer sa solution en terme de tâches ou d'objets, chaque objet pouvant utiliser la technique qui lui convient le mieux pour implanter un mécanisme d'explication.

C'est Chandrasekaran et ses collègues qui ont développé le modèle des tâches génériques [Chandrasekaran, 86], et ont caractérisé un ensemble d'approches pouvant être suivies pour résoudre des problèmes de diagnostic ou de modélisation. Ils ont utilisé leur analyse des tâches génériques pour améliorer la génération d'explications, en définissant un langage pour chaque type de tâche générique, ce langage permettant l'expression d'opérateurs abstraits dans chaque méthode générique. Des routines explicatives ont été associées à chacune de ces méthodes génériques, l'avantage étant que ces routines explicatives «comprennent» ce qu'elles expliquent à un niveau abstrait, et sont donc plus efficaces.

Dans cette approche des tâches génériques, la connaissance reliée aux méthodes est stockée dans les routines explicatives, ce qui fait que ces routines ne sont pas générales, mais construites spécialement pour expliquer un certain type de tâches. Par ailleurs, l'inconvénient principal de cette méthode provient également de l'une de ses forces : il est impossible d'utiliser une routine explicative pour une méthode générique autre que celle pour laquelle elle a été conçue.

La recherche d'une abstraction plus grande a conduit au modèle EES.

3.6.2.4 Le modèle EES (The Explainable Expert System Framework)

Dans ce modèle [Swartout et Moore, 93], les concepteurs de systèmes experts collaborent avec les experts du domaine pour construire une base de connaissances de haut niveau, qui retrace les faits du domaine, sa terminologie ainsi que les stratégies de résolution de problèmes. On peut considérer la base de connaissances comme une spécification abstraite du système expert à créer. Un programme d'écriture automatique construit alors un système exécutable à partir de cette spécification de haut niveau. Toutes les décisions de modélisation sont alors stockées, et le code produit par le programme d'écriture automatique est lié directement à cet historique de modélisation, ce qui permet de savoir quelles décisions de modélisation sont derrière chaque partie du système, et de produire une explication qui justifie les actions du système. Le modèle EES permet donc de retracer le raisonnement sous-jacent aux actions du système.

3.6.2.5 Un modèle basé sur la reconstruction d'explications

Jusque maintenant, les explications étaient produites en générant du texte à partir des mêmes structures de connaissances utilisées pour résoudre un problème. Pour que ces explications soient compréhensibles, le système devait être structuré de manière à utiliser des termes connus par l'utilisateur, et de manière à effectuer un raisonnement familier à ce dernier. Toutefois, ces conditions pouvaient parfois ne pas être remplies, et des techniques inconnues par les usagers devaient parfois être utilisées pour résoudre un problème.

Wick *et al.* [Wick et Thompson, 92] ont proposé d'utiliser une méthode de reconstruction des explications pour résoudre ce problème. Dans leur approche, un problème est d'abord résolu en utilisant des techniques pouvant être difficilement explicables. Parallèlement, une fois le problème résolu, une deuxième base de connaissances, utilisant des techniques différentes, est utilisée pour justifier les conclusions obtenues, l'important étant de donner une explication et une ligne de raisonnement plausibles. Wick *et al.* ont implanté cette approche des explications dans le système REX.

3.6.2.6 Autres approches

D'autres approches ont été utilisées pour générer des explications, en particulier des recherches en traitement du langage naturel et en linguistique informatique. Il serait ainsi intéressant de citer dans ce contexte un travail récent effectué dans le cadre du projet Cosmo, ce dernier étant également un agent pédagogique, et utilisant un certain mécanisme de génération des explications [URL5].

Les différentes méthodes de génération des explications étant présentées, nous allons aborder une notion critique dans les STI explicatifs : l'adaptation des explications à l'utilisateur.

3.7 Techniques d'adaptation des explications à l'utilisateur

Les explications ne s'adressant pas à un même profil d'utilisateur, mais à des multitudes de profils, il est important de les personnaliser de manière à ce qu'elles tiennent compte

- des connaissances de l'utilisateur [[Wick et Thompson, 92][Swartout et Moore, 93]];
- de ses plans;
- de ses préférences [Goguen *et al.*, 83];
- de ses objectifs;
- de ses prédispositions face au problème [Goguen *et al.*, 83];
- du niveau de dialogue nécessaire;
- de besoins ponctuels durant le raisonnement.

Différentes techniques peuvent être utilisées pour adapter les explications aux usagers [David *et al.*, 93] :

3.7.1 Adaptation du niveau de détail

Selon Grice [Grice, 75], de bonnes explications doivent être aussi informatives que possible, mais ne doivent pas inclure des détails non nécessaires. Aussi doit-on utiliser des stéréotypes d'utilisateurs en se basant par exemple sur leur niveau de connaissance, et doser le niveau de détail selon ces niveaux.

3.7.2 Adaptation du type d'information présenté

Des recherches sur les explications [Paris, 88] ont montré qu'en plus de varier le niveau de détail d'une explication, il pourrait être important de varier le type de l'information présentée, les différents niveaux d'utilisateurs n'ayant pas les mêmes besoins d'information. Ainsi par exemple, il peut être intéressant de présenter des éléments multimédias dans les explications selon la complexité du problème (images, sons, animations, vidéos, etc.).

3.7.3 Adaptation en fonction des connaissances de l'utilisateur

Il est important de distinguer les explications que l'on fournit à un expert (et qui ne servent définitivement qu'aux experts capables de les comprendre), et les explications qui s'adaptent au niveau de l'utilisateur. Il est nécessaire de bien préciser cette différence car c'est justement à cause de la première approche (explications dédiées à l'expert) que de nombreux systèmes n'ont pas su combler les attentes des utilisateurs [Bélanger *et al.*, 99]. Il est donc primordial que le système fournisse des explications efficaces du point de vue de l'utilisateur. Ce qui veut dire que ce dernier doit être apte à comprendre les explications qui lui sont présentées, et que ces dernières lui sont utiles, c'est-à-dire qu'elles l'aident soit dans son processus de prise de décision, soit dans sa résolution de problèmes. Ces caractéristiques sont essentielles, dans le sens où elles permettent à l'utilisateur de faire confiance au système, ce qui peut se révéler crucial, que ce soit dans un système d'aide à la décision, ou dans un système d'enseignement qui se veut crédible.

3.7.4 Adaptation en fonction des buts de l'utilisateur

Normalement, une bonne explication doit indiquer à l'utilisateur que ses buts ont été pris en considération [McKeown, 88]. De plus, le système doit pouvoir reconnaître que le plan de l'utilisateur n'est pas optimal, et lui proposer des solutions alternatives. Par ailleurs, les explications ne doivent pas seulement tenir compte des buts courants de l'utilisateur, mais également de ses buts et préférences précédents.

Ainsi, selon Höök [Höök, 95], les systèmes ayant un modèle des connaissances de l'utilisateur peuvent l'utiliser pour adapter leurs explications, et cela, en :

- évitant les concepts non connus de l'utilisateur, ou en expliquant ces mêmes concepts ;

- faisant varier la quantité d'informations, ainsi que son niveau de détail ;
- fournissant des informations, non forcément explicitement demandées, mais susceptibles d'apporter un plus dans le contexte ;
- faisant varier le style de l'explication.

3.7.5 Adaptation aux tâches de l'utilisateur [Höök, 95]

Höök estime que l'on peut également adapter des explications selon la tâche courante de l'utilisateur. Ce sont donc, à notre sens, des explications reliées au contexte.

3.8 Conclusion

Compte tenu de tout ce qui a été présenté jusqu'à maintenant, il serait judicieux d'effectuer une petite récapitulation :

Nous nous sommes focalisés dans notre recherche sur le problème de l'aide dans les STI, et plus particulièrement sur la présentation d'explications visant à assister l'apprenant dans son apprentissage. C'est pourquoi nous avons abordé différents aspects liés aux explications :

- la définition d'une explication. Dans le cadre de notre projet, nous considérons une explication comme une connaissance devant éclaircir un point d'ombre, ou corriger une conception erronée ;
- nous nous situons dans la catégorie des systèmes d'aide à la formation puisque notre projet s'insère dans le cadre des STI ;
- notre objectif est d'opter pour une génération statique des explications, car dans le cadre des systèmes de formation, nous pensons que les explications humaines ne peuvent être égalées par des explications fournies par un système informatique ;
- nous avons insisté sur les techniques d'adaptation des explications aux usagers. En effet, cela représente un point crucial dans les STI, où l'interaction système-apprenant se doit d'être personnalisée et adaptée au modèle de l'apprenant. Suite au point 3 ci-dessus, notre objectif est d'inciter le concepteur à fournir des explications adaptées au niveau de connaissances de

l'apprenant et au contexte d'apprentissage, par un processus de réévaluation constant de ces explications. Nous détaillerons ce dernier point dans le chapitre 5 « Principes et implantation ».

Les explications dans un système de formation doivent être pertinentes, et présentées de façon convaincante. Notre objectif est d'utiliser la technologie des agents intelligents pour apporter cette assistance aux apprenants.

Le but du prochain chapitre est de définir cette technologie et de présenter l'état de l'art des agents dans le domaine de la formation. Cet état de l'art doit par la suite nous permettre de positionner notre travail.

CHAPITRE 4 L'APPROCHE AGENT DANS LES STI

Depuis quelques années, la technologie des agents intelligents est devenue un sujet de recherche très actif. On peut s'interroger sur ce qui a poussé tant de chercheurs à s'intéresser activement à cette technologie, ou métaphore. Depuis l'avènement de l'intelligence artificielle, le rêve (ou le cauchemar ?) des chercheurs a été de concevoir et réaliser une machine pensante, ayant quasiment des caractéristiques humaines. Le fait de concevoir un logiciel sous forme de penseur « quasi-humain », donc sous forme d'agent intelligent, relève probablement de cette utopie. Toutefois, peut-on encore parler d'utopie si l'on se réfère à l'article de Bill Joy [URL8], concernant les dangers de ce que nous pourrions appeler « la robotisation de l'humain » et « l'humanisation des machines » ?

Jusqu'à maintenant, aucun consensus sur la définition d'un agent n'a été adopté, certains chercheurs mettant l'emphasis sur ses caractéristiques (exemple : agent mobile), d'autres sur ses comportements (exemple : agent réactif) ou encore sur ses fonctions (exemple : agent d'interface).

En ce qui nous concerne, nous avons adopté la définition générique de Ferber [Ferber, 97] :

« On appelle agent une entité physique ou virtuelle

- a- qui est capable d'agir dans un environnement
- b- qui peut communiquer directement avec d'autres agents

- c- qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser)
- d- qui possède des ressources propres
- e- qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement
- f- qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune)
- g- qui possède des compétences et offre des services
- h- qui peut éventuellement se reproduire
- i- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit. »

Ceci étant dit, il est essentiel de relier cette technologie au domaine de l'enseignement. C'est le but des sections suivantes.

4.1 Introduction aux agents pédagogiques

4.1.1 Définition des agents pédagogiques

Le terme agent pédagogique est utilisé en référence aux agents modélisés pour aider l'être humain dans son apprentissage, et ceci par le biais d'une interaction avec les apprenants ayant pour but de faciliter leur formation. Les agents pédagogiques peuvent adapter leurs interactions aux besoins de l'apprenant et à l'état courant de l'environnement. Ils peuvent collaborer avec des apprenants et d'autres agents. Ils sont capables de fournir une rétroaction continue durant la session d'apprentissage. Enfin, ils peuvent apparaître sous forme de personnages, introduisant ainsi de l'émotion dans leur relation avec l'utilisateur [Johnson, 98].

4.1.2 Petit historique

Les travaux sur les agents pédagogiques ont débuté il y a une dizaine d'années, quand les chercheurs ont commencé à explorer de nouveaux types d'interactions entre les

ordinateurs et les apprenants. Ainsi, [Chan et Baskin, 90] ont développé un compagnon d'apprentissage simulé, qui agit plutôt comme un camarade que comme tuteur. [Dillenbourg, 96] s'est intéressé à l'étude de l'interaction entre des apprenants réels et simulés en tant que processus social de collaboration. [Chan, 96] a effectué des recherches sur d'autres types d'interactions, comme les compétiteurs ou les tuteurs réciproques.

Les travaux sur les agents pédagogiques actuels se placent dans le contexte d'environnements interactifs, et permettent une plus grande interaction entre les agents et les apprenants. Cette situation augmente la complexité de l'environnement dans lequel les agents évoluent, et fait clairement ressentir le besoin d'architectures d'agents capables de gérer cette complexité [Johnson, 98].

4.1.3 Propriétés des agents pédagogiques

Selon Johnson, les agents pédagogiques doivent détenir les propriétés et caractéristiques suivantes [Johnson, 98] :

4.1.3.1 L'autonomie

Les agents pédagogiques sont des agents autonomes, c'est pourquoi ils héritent d'un ensemble de caractéristiques qui distinguent les agents autonomes :

- ils doivent avoir un comportement robuste dans des environnements riches et imprévisibles ;
- ils ont à coordonner leur comportement avec celui d'autres agents et à gérer leur propre comportement de manière cohérente en choisissant entre différentes actions alternatives et en répondant aux stimuli provenant de l'environnement. Ce dernier inclut aussi bien les apprenants que l'environnement où les agents sont situés. Il est également intéressant de souligner que le comportement d'un apprenant est imprévisible de part sa nature même, et varie suivant un ensemble d'aptitudes, de niveaux de maîtrise et de styles d'apprentissage.

4.1.3.2 La connaissance du domaine et des tâches des apprenants

Leur fonction d'aide à l'enseignement impose toutefois aux agents pédagogiques de détenir un ensemble de propriétés et conditions que les autres types d'agents n'ont pas toujours besoin de satisfaire. Ils doivent posséder **une connaissance sur les tâches** que les apprenants doivent accomplir et **une connaissance du domaine**, afin de pouvoir participer aux activités de ces derniers.

4.1.3.3 La crédibilité

Un créneau particulièrement intéressant des agents pédagogiques est représenté par la personnification sous forme de caractères animés. Un agent de ce genre peut engager un dialogue continu avec l'apprenant. Il doit donner l'impression qu'il est "vivant" et crédible avec un comportement qui apparaît à l'usager comme naturel et approprié en fonction du rôle qu'il joue, en l'occurrence celui d'instructeur virtuel ou de guide. Le comportement d'un agent pédagogique peut ou non refléter ses représentations de connaissances, ses états mentaux et ses attitudes actuels. Cependant, la gestion d'interactions pédagogiques impose généralement une correspondance étroite entre l'apparence et l'état interne de l'agent (ses croyances, ses plans, sa connaissance du domaine, etc.). En effet, si l'agent apparaît sous les traits d'un personnage crédible mais qu'il est incapable de répondre aux questions de l'apprenant et de donner des explications, sa crédibilité sera rapidement remise en question [[Johnson, 98],[URL5]].

Il nous faut toutefois mentionner que les agents pédagogiques ne se limitent pas aux caractéristiques et propriétés citées ci-dessus, ainsi que nous le verrons dans les caractéristiques de notre agent explicatif (Chapitre 5).

4.1.4 Types d'interactions

4.1.4.1 Choix du type d'interface avec l'apprenant

Différents types d'interfaces peuvent être utilisées par les agents pédagogiques dans leur dialogue avec l'apprenant. Il peut s'agir d'interfaces textuelles, graphiques, ou encore de mondes virtuels. Les interfaces graphiques peuvent contenir des vidéos, des images, etc.

Les mondes virtuels, quant à eux, peuvent permettre à l'apprenant d'effectuer des tâches en situations quasi-réelles.

4.1.4.2 Interaction au moyen de conseils

Un agent pédagogique doit normalement être capable d'offrir des conseils judicieux lorsque cela est nécessaire, de donner des explications aussi claires que possible. Cela permet de guider les apprenants lorsqu'ils ne sont pas sûrs de ce qu'ils font.

4.1.4.3 Interaction au moyen de questions

Pareillement aux tuteurs réels, les agents pédagogiques peuvent poser des questions lors de certaines situations afin de s'assurer de la compréhension de l'apprenant.

De manière générale, cette capacité d'interagir au moyen de conseils et de questions permet aux agents pédagogiques de délivrer leur enseignement à l'apprenant dans le contexte de la résolution de problèmes, afin que l'apprenant puisse immédiatement utiliser la connaissance acquise (se reporter aux sections 4.2.2 (Adele) et 4.2.3 («Herman the bug»)).

4.1.4.4 Interaction au moyen de démonstrations

Les agents pédagogiques peuvent également effectuer des démonstrations de tâches lorsque cela s'avère nécessaire.

Ces considérations générales étant établies, nous pouvons maintenant aborder le chapitre des réalisations dans le domaine des agents pédagogiques.

4.2 Revue de l'art des agents pédagogiques

4.2.1 Projet développé à l'USC (University of Southern California) - Steve (Soar Training Expert for Virtual Environment)

Membres du projet : Jeff Rickel, Lewis Johnson

4.2.1.1 Présentation du projet

La réalité virtuelle offre des opportunités intéressantes dans le domaine des STI. Les apprenants peuvent être secondés par un tuteur logiciel, qui les accompagne dans le monde virtuel. C'est dans ce cadre qu'a été développé Steve, un agent pédagogique qui agit dans un environnement virtuel et aide les apprenants à effectuer des tâches manuelles et procédurales telles que l'exploitation et la réparation d'équipements.

Johnson et son équipe ont désigné Steve comme étant un agent pédagogique parce que, de façon générale, son imbrication en tant que tuteur avec le domaine de la réalité virtuelle lui donne selon eux, une nouvelle forme d'intelligence, et lui permet d'aborder différemment le domaine des STI [Rickel et Johnson, 97]. Par ailleurs, selon nous, Steve adhère à la définition d'un agent telle que présentée par Ferber [Ferber, 97].

4.2.1.2 Personnification de l'agent

Steve est représenté par une tête, un torse et une main qui peut manipuler et désigner des objets.

4.2.1.3 Représentation du modèle de l'apprenant

La réalité virtuelle permet au tuteur de capter l'attention visuelle de l'apprenant ainsi que ses mouvements physiques (par exemple : la position et l'orientation de ces mains). C'est ce type d'information qui représente le modèle de l'apprenant dans Steve, et qui lui permet d'adapter ses interactions avec l'apprenant.

4.2.1.4 Types d'interactions avec l'apprenant

La réalité virtuelle permet un grand nombre d'interactions entre l'apprenant et le tuteur : ils peuvent **physiquement collaborer** pour la réalisation de tâches et **communiquer de**

façon non verbale, ce que ne permettent pas les tuteurs traditionnels sans incarnation physique.

Steve possède deux capacités majeures :

- il peut effectuer des démonstrations de tâches, donner des explications, contrôler les actions de l'apprenant et lui prodiguer de l'assistance quand cela s'avère nécessaire. Lors de la démonstration, Steve effectue et explique verbalement chaque étape de la tâche. Il maintient une mémoire épisodique des situations dans lesquelles il effectue des actions. Aussi, peut-il justifier constamment ses actions.
- il peut contrôler l'exécution de tâches par l'apprenant. Ce dernier peut à tout moment lui demander ce qu'il doit faire par la suite.

Ses fonctions ont ensuite été étendues pour lui permettre d'agir en tant que coéquipier dans l'apprentissage en équipe [Rickel et Johnson, 98]. Il fait partie d'un large système d'environnements virtuels d'apprentissage (VET) développé par l'USC Information Sciences Institute, l'USC Behavioral Technology Laboratory et Lockheed Martin [Rickel et Johnson, 97].

4.2.2 Projet développé à l'USC (University of Southern California) - Adele (Agent for Distance Learning Environments)

Membres du projet : Lewis Johnson, Erin Shaw, Rajaram Ganeshan

4.2.2.1 Présentation du projet

Adele est le personnage principal du projet ADE (Advanced Distance Education) [Johnson *et al.*, 98]. C'est un agent pédagogique (implanté en Java) modélisé pour aider des apprenants dans la résolution d'exercices intégrés dans un cours sur le Web.

4.2.2.2 Personnification de l'agent

Adele est représentée par un personnage animé. C'est une applet Java qui peut être utilisée de façon isolée ou incorporée dans une application plus large. Le système intégré est téléchargé et exécuté sur le poste du client pour des raisons d'efficacité.

Adele possède un répertoire d'expressions faciales et de postures corporelles qui représentent des émotions, comme la surprise ou le désappointement.

4.2.2.3 Représentation du modèle de l'apprenant

Adele utilise effectivement un modèle de l'apprenant pour adapter ses interactions à ce dernier. Ce modèle comporte les différentes actions de l'apprenant, et son niveau d'expertise.

4.2.2.4 Types d'interactions avec l'apprenant

En fonction de son mode d'enseignement, Adele peut mettre en relief les aspects intéressants du cas, guider l'apprenant et réagir à ses actions, prodiguer des conseils dans des situations particulières ou questionner l'apprenant afin d'être sûre qu'il a bien compris les principes sous-jacents du cas.

Un ensemble de leçons ont été retenues par les auteurs suite à la réalisation d'Adele :

- l'exécution de l'agent tuteur sur le poste client plutôt que sur le serveur est beaucoup plus avantageuse pour le temps de réponse. De plus, un agent peut également se baser sur un serveur central, pour l'enregistrement par exemple des progrès des apprenants dans la base de données, et pour permettre la synchronisation d'exercices utilisés par différents apprenants sur différentes machines.
- l'utilisation d'un agent intelligent est intéressante, ne serait-ce que pour le caractère «humain» qu'elle introduit, qui peut avoir une grande influence sur la motivation de l'apprenant.
- les agents pédagogiques doivent posséder une connaissance du domaine suffisante pour pouvoir gérer les dialogues avec l'apprenant. Leur comportement et apparence doivent améliorer la perception, par les apprenants, de leur expertise.

4.2.3 Projet développé à NCSU (North Carolina State University) - «Herman the bug»

Membres du projet :Brian A. Stone, James C. Lester, Charles B. Callaway, Stuart G. Towns

4.2.3.1 Présentation du projet

Selon Lester et son équipe [Lester *et al.*, 97], les agents pédagogiques animés conjuguent une fonctionnalité de réactivité et de réponse (feedback) à une forte présence visuelle.

C'est dans ce contexte qu'a été développé l'environnement d'apprentissage DESIGN-A-PLANT, dans le domaine botanique. Un environnement aux conditions biologiques particulières (incidence moyenne du soleil, degré d'engrais dans le sol, degré d'eau disponible) est tout d'abord présenté aux apprenants. Ces derniers doivent tenir compte de ces conditions avant d'effectuer leur choix dans une librairie de composants (racines, tiges et feuilles), définis par des caractéristiques particulières. Les apprenants utilisent ces composants pour «construire» une plante censée survivre dans l'environnement de départ. Si tel n'est pas le cas, ils doivent reconsidérer les composants utilisés jusqu'à obtenir une plante robuste et bien vivante. « Herman the bug » est un agent pédagogique qui a été implanté spécialement pour aider les apprenants dans cet environnement, en leur prodiguant des conseils lors de « l'assemblage » de la plante [Stone et Lester, 96].

4.2.3.2 Personnification de l'agent

« Herman the bug » est représenté sous la forme d'un insecte loquace, original, parfois désagréable, ayant une propension à voler et à plonger dans les structures d'une plante lorsqu'il prodigue des conseils aux apprenants.

4.2.3.3 Représentation du modèle de l'apprenant

« Herman the bug » maintient un modèle de l'apprenant comprenant les différentes actions des apprenants.

4.2.3.4 Types d'interactions avec l'apprenant

Les comportements d'Herman sont guidés par des engins de séquençement de comportement (behavior sequencing engines) qui sélectionnent et assemblent les comportements de l'agent de manière dynamique. Pour ce faire, deux aspects doivent être pris en considération [Lester *et al.*, 97]:

- **le contrôle d'initiatives** : les interactions agent-apprenant sont caractérisées par des changements fréquents dans la prise d'initiatives. Ainsi, par exemple, au début de chaque session, les apprenants ne sont pas familiers avec l'environnement, aussi l'agent doit-il prendre l'initiative de l'introduire. C'est ce qu'accomplit « Herman the bug » en décrivant les conditions environnementales dans lesquelles la plante va être créée. Lors de la résolution du problème, les apprenants doivent être capables d'être maîtres de leur travail, mais l'agent doit également être capable d'intervenir si une difficulté est rencontrée, ou si les apprenants posent une question, et de repasser ensuite le contrôle aux apprenants pour leur permettre de continuer leur tâche. « Herman the bug » contrôle de cette façon la création d'une plante et intervient pour prodiguer des explications sur l'anatomie botanique de la plante si un problème se pose.
- **l'explication** : lorsqu'un agent pédagogique prend une initiative, c'est essentiellement pour donner une explication. Toutefois, cette dernière doit véhiculer un éclaircissement des concepts du domaine en plus d'une aide à la résolution d'un problème. Ces explications doivent être étroitement liées aux connaissances de base dans des problèmes concrets. Ainsi, « Herman the bug » doit par exemple aider les apprenants à maîtriser les concepts de morphologie d'une feuille durant la sélection d'un type particulier de feuille.

4.2.4 Projet développé à NCSU (North Carolina State University) - Cosmo

Membres du projet : James C. Lester, Charles B. Callaway, Stuart G. Towns

4.2.4.1 Présentation du projet

Animés par le même esprit que pour « Herman the bug », Lester *et al.* ont créé un autre agent nommé Cosmo, regroupant les fonctionnalités de conseiller et de présence «vivante», et permettant de ce fait une interaction visuelle avec l'apprenant [Lester *et al.*, 98].

Certains fondements théoriques sont à la base de la réflexion de ces auteurs. En effet, pour concevoir des agents pédagogiques animés, deux aspects importants doivent, selon Lester *et al.*, être pris en considération [Lester *et al.*, 98] :

- l'agent doit être capable de se mouvoir dans son environnement et de faire référence aux objets de cet environnement lors de l'émission d'un avis, en combinant mouvements, gestes et dialogue. Lester *et al.* parlent de « crédibilité déictique » (deictic believability).
- l'agent doit également avoir une crédibilité émotive (emotive believability), c'est-à-dire qu'il doit pouvoir manifester des comportements émotifs afin de motiver et d'encourager les apprenants (expressions faciales, gestes expressifs, ...).

4.2.4.2 Personnification de l'agent

Cosmo est représenté par une créature espiègle, munie d'antennes, qui voltige dans un monde virtuel de routeurs et de réseaux pour aider les apprenants à acheminer leurs paquets à travers le réseau vers des destinations spécifiques.

4.2.4.3 Représentation du modèle de l'apprenant

Cosmo utilise une représentation du modèle de l'apprenant pour générer dynamiquement des explications. Ce modèle contient un historique des actions que l'apprenant a effectuées.

4.2.4.4 Types d'interactions avec l'apprenant

Cosmo interagit avec l'apprenant au moyen d'explications, générées dynamiquement. Il fournit des conseils aux apprenants en cours de résolution de problèmes. Lorsque les apprenants tentent de fournir diverses solutions, il leur explique des concepts reliés et leur donne des conseils. Il fournit des explications dans deux situations :

- lorsqu'un apprenant fait une pause prolongée en cours de résolution, ce qui pourrait indiquer un blocage;
- lorsqu'un apprenant commet une erreur.

4.2.5 Projet développé au DFKI (German Research Center For Artificial Intelligence GmbH): PPP Persona (Personalized Plan Based Presenter)

Membres du projet : Elisabeth André, Thomas Rist, Jochen Müller

4.2.5.1 Présentation du projet

Bien que Johnson [Johnson, 98] ait placé l'agent PPP Persona dans la catégorie des agents pédagogiques, nous ne sommes pas tout à fait d'accord, car il nous semble que cet agent est, en premier lieu, un agent d'interface. Il a néanmoins une connotation pédagogique, puisque qu'il évolue généralement dans des environnements d'apprentissage. Aussi a-t-on choisi malgré tout de le présenter dans le cadre du présent mémoire.

PPP Persona est un agent animé utilisé pour présenter oralement (montrer, expliquer et commenter un texte ou une représentation graphique) de l'information sur le web, dans le cadre d'applications liées au domaine de l'enseignement.

4.2.5.2 Personnification de l'agent

PPP Persona est représenté par un petit bonhomme animé, qui commente verbalement le contenu qu'il présente.

4.2.5.3 Représentation du modèle de l'apprenant

Dans PPP Persona, le modèle de l'apprenant correspond à deux modèles stéréotypes d'utilisateurs : un modèle stéréotype de novice, et un modèle stéréotype d'expert. Si un

nouvel utilisateur se présente, son modèle de l'apprenant est initialisé aux valeurs du modèle stéréotype novice. Ces modèles retracent les buts, préférences et connaissances des usagers.

4.2.5.4 Types d'interactions avec l'apprenant

L'apprenant ne peut communiquer avec l'agent au moyen du langage, mais par le biais d'actions sur l'interface. Ainsi, par exemple, lors d'un cours d'introduction sur les planètes du système solaire, l'apprenant a la possibilité de demander à l'agent un supplément d'information, en cliquant sur des composants de l'interface [Andre *et al.*, 97]. Ces présentations ont une structure qui offre à l'utilisateur un choix entre différentes possibilités, ce qui permet à la présentation de changer lors de l'exécution, en fonction des interactions de l'utilisateur. Par ailleurs, la nouveauté de l'approche réside, selon les auteurs, dans le fait que les scripts de présentation et les structures de navigation ne sont pas stockés à l'avance mais générés automatiquement à partir d'une base de connaissances.

4.2.6 Projet développé à UWF (University of West Florida): The Giant

Membres du projet : Thomas R. Reichherzer, Alberto J. Cañas, Kenneth M. Ford, Patrick J. Hayes [Reichherzer *et al.*, 98]

4.2.6.1 Présentation du projet

L'objectif de ce projet est de permettre à des élèves de construire et d'échanger leurs croyances sur un sujet donné par le biais d'un environnement d'apprentissage nommé « the concept map editor ». L'idée de base de ce logiciel est de permettre la construction et le partage de la connaissance à travers des cartes de concepts (concept maps), c'est-à-dire à travers une représentation des concepts et de leurs liens.

L'apprenant construit ses cartes de concepts sur un sujet donné et le système est capable d'identifier les propositions relatives aux cartes et de les stocker. Les apprenants ont la possibilité de garder leurs propositions secrètes, mais le système encourage la collaboration en leur permettant de les publier de façon anonyme, c'est-à-dire de les rendre visibles aux autres apprenants, et de ce fait, de se porter garants de leur véracité.

4.2.6.2 Personnification de l'agent

« The Giant » est représenté sous les traits d'un agent enthousiaste et amical, faisant plutôt office de compagnon. Il est représenté par un personnage en deux dimensions.

4.2.6.3 Représentation du modèle de l'apprenant

« The Giant » ne maintient pas un modèle de l'apprenant à proprement parlé. Il est toutefois capable de savoir quelles sont les propositions générées par les apprenants, et de les utiliser pour générer sa propre proposition.

4.2.6.4 Types d'interactions avec l'apprenant

« The Giant » tente de capturer l'attention de l'apprenant en lui présentant sa propre compréhension du sujet, basée sur les croyances exprimées par l'apprenant même ainsi que par les autres apprenants. Il la présente alors à l'apprenant et lui demande de se prononcer sur sa véracité. Placé devant la nécessité de décider si les assertions de l'agent sont correctes, incorrectes, ou encore stupides, l'apprenant se voit attribué le rôle du tuteur, ce qui le pousse, selon les auteurs, à réfléchir sur les propositions de l'agent, sur les siennes propres ainsi que sur celles des autres apprenants. Les conclusions de « The Giant » peuvent être complètement irrationnelles en raison de ses capacités de raisonnement limitées basées sur une sélection aléatoire des propositions de l'apprenant, aussi cela aboutit-il parfois à un comportement quelque peu stupide mais surtout amusant. Dans tous les cas, elles jouent le rôle de « déstabilisateur » pour l'apprenant, ce qui encourage ce dernier à approfondir sa réflexion. Par ailleurs, elles permettent à l'apprenant de considérer « The Giant » comme un collaborateur inoffensif, ce qui le pousse à lui prodiguer de l'assistance.

L'agent n'intervient jamais durant le travail de l'apprenant. C'est plutôt ce dernier qui décide du moment où il va interagir avec lui, en lui demandant une explication sur l'une de ses propositions, c'est-à-dire sur son raisonnement. Le système ouvre alors une boîte de dialogue, qui permet à l'apprenant d'accepter ou de refuser le raisonnement de l'agent. Dans tous les cas, l'avis de l'apprenant est bien accueilli par l'agent.

Selon les auteurs, le projet a donné lieu à des résultats concluants, particulièrement en terme de motivation des apprenants.

4.2.7 Projet développé à "The MITRE Corporation": L'agent pédagogique OWL : (Organization-Wide Learning)

Membres du projet : Frank Linton, Andy Charron et Debbie Joy

4.2.7.1 Présentation du projet

L'agent OWL, développé par [Linton *et al.*, 98], permet, selon ses auteurs, une amélioration graduelle et continue des performances lors de l'utilisation d'une application logicielle au sein de l'entreprise, et ce, afin de capturer l'évolution de l'expertise et la création d'un "savoir" de l'entreprise.

Ainsi, OWL permet de s'emparer de l'évolution de l'expertise dans une communauté, de seconder les membres les moins expérimentés et de servir de mémoire organisationnelle des expertises considérées.

4.2.7.2 Personnification de l'agent

Aucune personnification de l'agent n'a été mentionnée par les auteurs.

4.2.7.3 Représentation du modèle de l'apprenant

Ce projet explore les potentialités d'une méthode de modélisation du profil de l'apprenant, basée sur la récapitulation des données de l'utilisateur (disponibles à travers l'observation de ce dernier pendant sa session de travail) qui sont stockées dans un journal. L'agent peut donc offrir à l'apprenant un modèle individuel et des directives basées sur une comparaison automatique de ce modèle avec les modèles des experts. Selon Linton et son équipe [Linton *et al.*, 98], leur approche est intéressante du fait qu'elle est généralisable à l'ensemble des applications où les utilisateurs effectuent des tâches similaires.

4.2.7.4 Types d'interactions avec l'apprenant

L'agent OWL dispose de deux méthodes pour interagir avec l'utilisateur :

- une méthode active, utilisée pour les apprenants passifs et qui consiste à offrir des conseils intelligents à l'apprenant quand cela est nécessaire.
- une méthode passive utilisée pour les apprenants actifs, dans laquelle l'agent offre à l'apprenant une interface lui permettant de comparer son modèle avec le modèle expert ou celui d'autres utilisateurs.

Ces informations permettent à l'apprenant de choisir la commande adéquate à exécuter lors d'une utilisation ultérieure. Par ailleurs, grâce à la méthode passive, il peut arriver à déduire l'utilité des commandes utilisées par les autres apprenants, profitant ainsi de l'expertise de ces derniers pour améliorer la sienne.

4.2.8 Projet développé à CHI Systems, Inc. : Un agent dans l'aéronautique

Réalisé par *Joan M. Ryder*

4.2.8.1 Présentation du projet

Dans le domaine de la formation des pilotes (Unmanned Aerial Vehicle), les simulateurs traditionnels n'offrent ni diagnostic automatique ni interaction (feedback) avec l'apprenant. En effet, les instructeurs humains observent l'apprenant de l'extérieur et examinent les résultats de la simulation pour fournir un compte-rendu à la fin de la mission seulement. Pour permettre une interaction avec l'apprenant pendant la mission, Ryder [Ryder, 1998] a développé un agent pédagogique capable de contrôler les performances de l'apprenant, de permettre un apprentissage pendant ou après la mission et de diagnostiquer les problèmes liés à l'application de concepts pendant le vol.

4.2.8.2 Personnification de l'agent

Aucune personnification de l'agent n'a été mentionnée par les auteurs.

4.2.8.3 Représentation du modèle de l'apprenant

Le profil de l'apprenant contient le niveau atteint par l'apprenant ainsi que les règles de jugement de la performance de l'apprenant et de mise à jour du progrès de ce dernier.

4.2.8.4 Types d'interactions avec l'apprenant

De façon générale, les auteurs ont indiqué que l'agent présentait des conseils aux apprenants pendant et après une mission, mais ils ne se sont pas étendus sur le sujet.

L'agent a pour rôle:

- d'interpréter l'état du problème ou le niveau d'entraînement permettant d'atteindre un objectif ;
- d'identifier les événements et/ou les conditions qui déclenchent le processus de mesure de la performance et/ou la présentation de l'enseignement ;
- de présenter l'enseignement correspondant aux besoins de l'apprenant ;
- de contrôler les interventions durant l'acheminement des processus de mesure des performances de l'apprenant et de l'enseignement.

Selon l'auteur, l'utilisation d'agents pédagogiques avec des simulations de missions pourrait résulter en une utilisation plus efficace des instructeurs ainsi qu'en un meilleur développement des capacités et habiletés de l'apprenant.

4.3 Apport des agents pédagogiques à notre projet

Nous avons présenté différentes réalisations dans le domaine des agents pédagogiques. Nous pouvons récapituler les différents points retenus de ces projets, et dont nous comptons nous inspirer :

4.3.1 Type de l'interface avec l'apprenant

Nous avons vu que les agents pédagogiques peuvent communiquer avec les apprenants au travers différents types d'interfaces (textuelles, graphiques, mondes virtuels). Tout comme Adele, nous comptons adopter une interface graphique traditionnelle.

La réalisation de l'agent explicatif dans un environnement virtuel serait une extension possible, mais que nous n'allons pas implanter.

4.3.2 Types d'interactions avec l'apprenant

- Plusieurs types d'interactions ont été utilisés par les agents pédagogiques présentés :
 - collaboration physique pour la réalisation de tâches;
 - communication de façon non verbale;
 - démonstrations de tâches;
 - présentation d'explications;
 - interaction au moyen de questions;
 - interaction par le biais d'actions sur l'interface;

De façon générale, nous allons nous baser sur la présentation d'explications et conseils à l'apprenant. Ces explications pourront également contenir des démonstrations de tâches.

- Le passage quasi naturel de Steve du mode contrôle au mode démonstration nous a semblé opportun. « Herman the bug » implante aussi ce contrôle d'initiatives. De façon similaire, l'agent explicatif donnera un certain contrôle à l'apprenant (durant la résolution d'exercices) et reprendra la main lorsque ce dernier rencontrera des difficultés dans la résolution d'un exercice (phase explication).

4.3.3 Représentation d'un modèle de l'apprenant

- Tous les agents pédagogiques se basent sur le modèle de l'apprenant pour décider de l'action à effectuer.

De façon similaire, l'agent explicatif présentera des explications différentes suivant le profil de l'apprenant.

- Tout comme OWL, l'agent explicatif effectuera une récapitulation des données de l'apprenant et les stockera dans une sorte de journal (dans son modèle de l'apprenant). Leur seule différence réside dans le fait que notre agent utilisera ces données pour ses propres conclusions, et ne les présentera pas à l'apprenant (comme OWL), mais plutôt au concepteur.

4.3.4 Personnification de l'agent

Presque tous les agents sont personnifiés, généralement sous forme de personnages animés.

Notre agent explicatif sera représenté par un personnage, sans toutefois être animé comme c'est le cas dans Adele, « Herman the bug », Cosmo, PPP Persona et the Giant.

Toutefois, nous avons pour objectif que l'agent explicatif parle, c'est-à-dire que le mouvement des lèvres suive ses paroles, et que différentes expressions viennent ponctuer son discours, en réaction à un événement dans l'environnement, ce qui pourrait déjà donner l'illusion d'une présence plus ou moins "vivante".

4.3.5 Autres apports

- Tout comme Adele, nous pensons que l'exécution de l'agent explicatif sur le poste de l'apprenant plutôt que sur le serveur est une idée intéressante, que nous allons implanter.
- L'agent explicatif se basera également sur un serveur central, pour mettre à jour le modèle de l'apprenant, et enregistrer tous les paramètres ayant trait à la session d'apprentissage.

4.4 Conclusion

L'objectif de notre travail est d'apporter une aide efficace aux apprenants. Nous avons décidé d'utiliser la technologie des agents intelligents pour ce faire.

Aussi, avons-nous parcouru les points suivants dans ce chapitre :

- nous avons défini la notion d'agent intelligent;
- nous avons défini les agents pédagogiques, et avons dressé un bref historique de leur évolution;
- nous avons détaillé les caractéristiques nécessaires à la fonction d'enseignement des agents pédagogiques, ainsi que les types d'interactions possibles;
- enfin, nous avons présenté une revue de l'art des agents pédagogiques en détaillant leur apport à notre agent explicatif;

Ces différentes notions seront utilisées dans notre agent explicatif.

Notre revue de l'art des STI, des explications et des agents pédagogiques nous a permis de situer l'existant dans le domaine, afin de mieux positionner par la suite notre travail. Nous avons pris certaines décisions (dans le modèle de l'apprenant à utiliser, dans les actions et caractéristiques de notre agent explicatif, dans la manière de modéliser les connaissances dans notre système, etc.) en nous basant sur cet existant, et sur certaines des conclusions auxquelles étaient parvenus les auteurs de cet existant (avantages, inconvénients de l'approche). Nous avons également constaté certaines insuffisances dans le domaine de l'aide dans les STI, et c'est pourquoi notre recherche s'est orientée sur ce point particulier, avec comme objectif d'apporter une certaine amélioration.

Tous ces concepts étant introduits, nous pouvons maintenant passer à la partie implantation du projet, en en décrivant le contexte général et en justifiant nos décisions conceptuelles.

CHAPITRE 5 PRINCIPES ET IMPLANTATION

5.1 Introduction

L'utilisation du Web comme support à l'enseignement et plus précisément à la formation à distance est une réalité désormais incontournable. Ses potentialités sont d'autant mieux exploitées dans le cadre d'environnements d'apprentissage interactifs et intelligents, tendant à se rapprocher le plus possible du modèle d'enseignement avec un professeur humain tel que nous le connaissons dans nos universités actuellement.

Depuis plusieurs années, le concept d'université ou de campus virtuels s'est imposé et a donné lieu à de nombreuses expériences. Ce concept ne désigne néanmoins qu'une connaissance transmise sous forme textuelle électronique ou autre (textuelle, audiovisuelle, informatique, télématique), et ne semble effectif, selon nous, que pour des apprenants déjà autonomes, capables de s'auto-former [URL13]. L'université virtuelle dans cette acception du terme s'adresse donc à un profil psychologique particulier d'apprenant.

Pour assurer un enseignement généralisé, avec le plus grand taux de réussite possible, il importe d'ajouter à cette notion d'université virtuelle celle d'enseignement guidé par une logique pédagogique, et de pallier aux faiblesses du campus virtuel en lui adjoignant des «enseignants virtuels». C'est dans cet esprit que nous avons développé un STI, visant à enseigner un ensemble de cours dans les domaines les plus divers (maintenance mécanique, langages de programmation, histoire, ...). Ce STI se base sur la notion

d'agents intelligents faisant office d'enseignants virtuels. Il a été développé dans le cadre du projet «Enseignement à distance», au sein d'une équipe à Virtuel-Âge International Inc. Ce projet³ se compose de deux volets essentiels :

- un environnement d'édition de cours ;
- un environnement d'apprentissage, qui est le STI à proprement parlé ;

Bien que différentes techniques adaptatives existent pour les systèmes d'enseignement à distance (sur le Web), peu d'entre eux les emploient. Ils sont donc généralement statiques, mais surtout, ils n'effectuent pas de raisonnement en fonction de l'apprenant. Ils sont donc incapables de personnaliser leur interaction avec ce dernier, du moins de manière automatique et au fur et à mesure du déroulement de la session d'apprentissage. C'est ce que notre système se propose de réaliser, via la technologie des agents intelligents.

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'architecture globale du projet «Enseignement à distance» avant de se focaliser sur l'agent explicatif et les modules qui lui sont reliés.

5.2 Architecture globale du système

L'architecture globale du système est présentée dans la figure 6. C'est une architecture client-serveur qui est, de façon générale, scindée en deux parties :

- un environnement d'édition de cours sur le serveur où le concepteur peut créer ses cours, exercices et explications;
- un environnement d'apprentissage faisant appel à des agents intelligents sur le poste de l'apprenant.

Nous allons nous baser sur cette architecture globale pour expliquer les différents composants de notre projet.

³ Ce projet (y compris les modules présentés dans ce mémoire) a été entièrement implanté en Visual J++

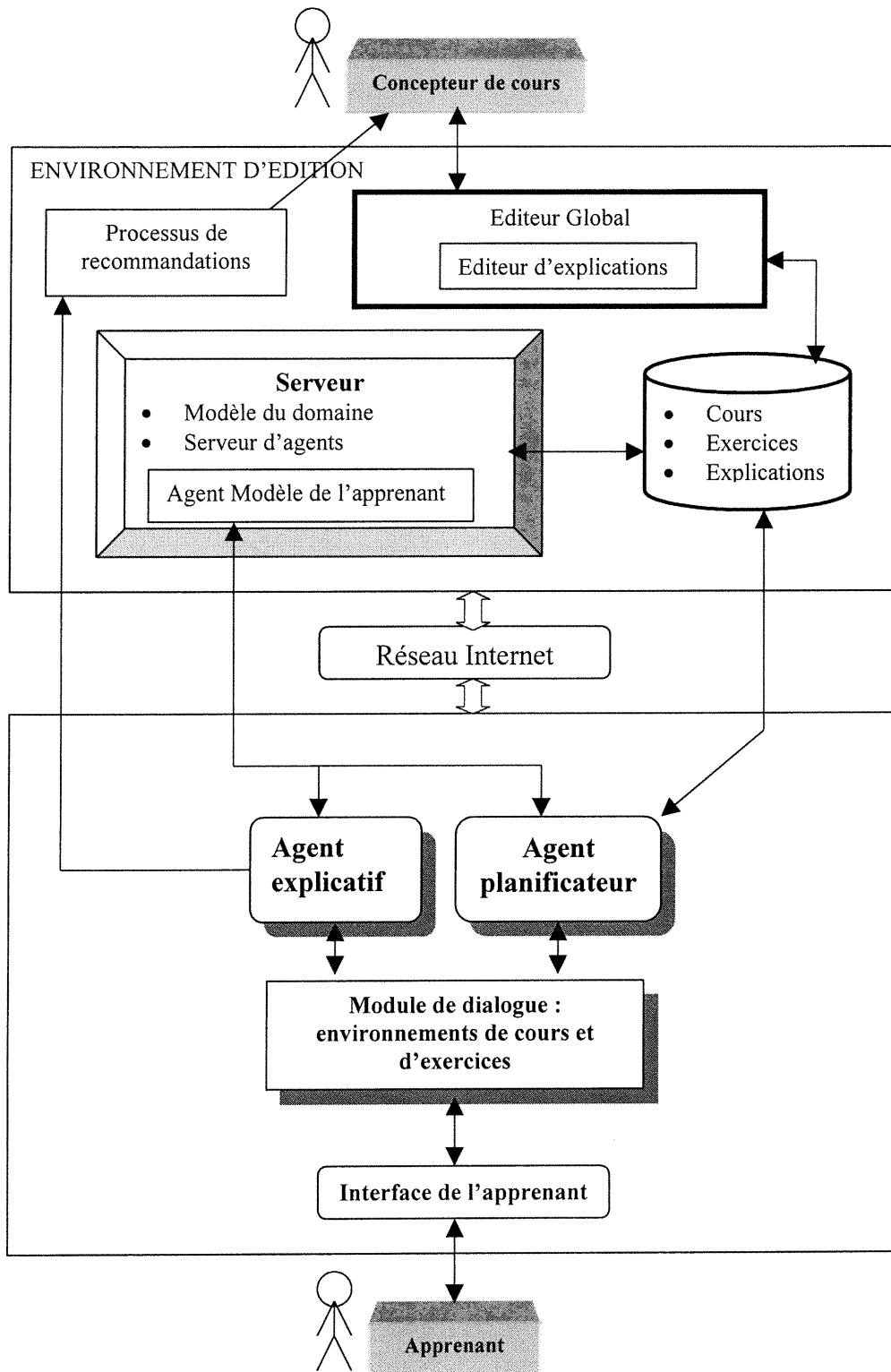


Figure 6 : Architecture du système tutoriel intelligent

Nous allons tout d'abord aborder l'environnement d'édition.

5.3 L'environnement d'édition

5.3.1 Structuration d'un cours

Le concepteur de cours dispose d'un environnement d'édition lui permettant de rentrer des cours (sous forme de pages Web) selon une structure que nous avons créée au sein d'une équipe de Virtuel-Âge International Inc. Cette structure est représentée par une forme arborescente composée d'unités cognitives et de concepts.

Une unité cognitive est une unité de connaissance qui peut être de taille réduite ou non, et qui peut à son tour se composer de sous-unités cognitives.

Les concepts représentent quant à eux les mots clés de l'unité cognitive, sans lesquels la sémantique de cette dernière ne saurait être complète.

Nous avons opté pour cette terminologie afin de structurer le cours en différentes parties pouvant être enseignées en une progression constante, tout en soulignant les concepts nécessaires à la compréhension des unités cognitives dans lesquelles ils sont définis.

5.3.2 Typologie des exercices

Dans chacune de ces unités cognitives, le concepteur de cours peut créer différents types d'exercices : questions à choix multiples, questions à choix multiples multiples, réponses numériques, textes à compléter, problèmes à étapes, ... C'est ce que nous désignons sous le vocable d'exercices génériques. Il existe également des exercices spécifiques que nous concevons lorsque nous constatons un réel besoin pour ce type d'exercices dans le domaine traité. Cela veut dire que notre système n'est pas figé, mais peut s'étendre à de nouveaux exercices dès l'instant où ces derniers respectent les standards que nous avons définis (au sein d'une équipe à Virtuel-Âge International Inc.), et fournissent les informations nécessaires au système. En effet, pour chacun de ces exercices, le concepteur doit définir :

- un seuil de succès dans la résolution de l'exercice ainsi qu'un seuil d'échec allant de 0 à 100 (en pourcentage) ;
- la ou les bonnes réponses, ainsi qu'une librairie d'erreurs. Un groupe d'explications doit être associé à chacune de ces erreurs, ce groupe d'explications pouvant comporter une à n explications ;

La figure 7 représente l'interface de l'éditeur de problèmes à étapes (qui représente un type d'exercices). Le concepteur définit un ensemble d'étapes, établit la ou les séquences d'étapes qui représentent une réponse correcte, ainsi qu'une ou plusieurs mauvaises séquences auxquelles il associe des explications, ainsi que mentionné un peu plus haut.

L'importance des problèmes à étapes réside dans le fait qu'ils sont applicables à de nombreux domaines (comme l'aéronautique par exemple) où une séquence d'actions doit être effectuée. Il peut ainsi être intéressant pour un élève pilote d'effectuer un exercice récapitulant l'ensemble des étapes d'un décollage avant de procéder en terrain réel. Par ailleurs, le concepteur de l'exercice peut associer à chaque action une page Web donnant sa description détaillée. On peut en imaginer les avantages si l'on pense à une vidéo à inclure dans la page Web, par exemple, retraçant l'action à accomplir.

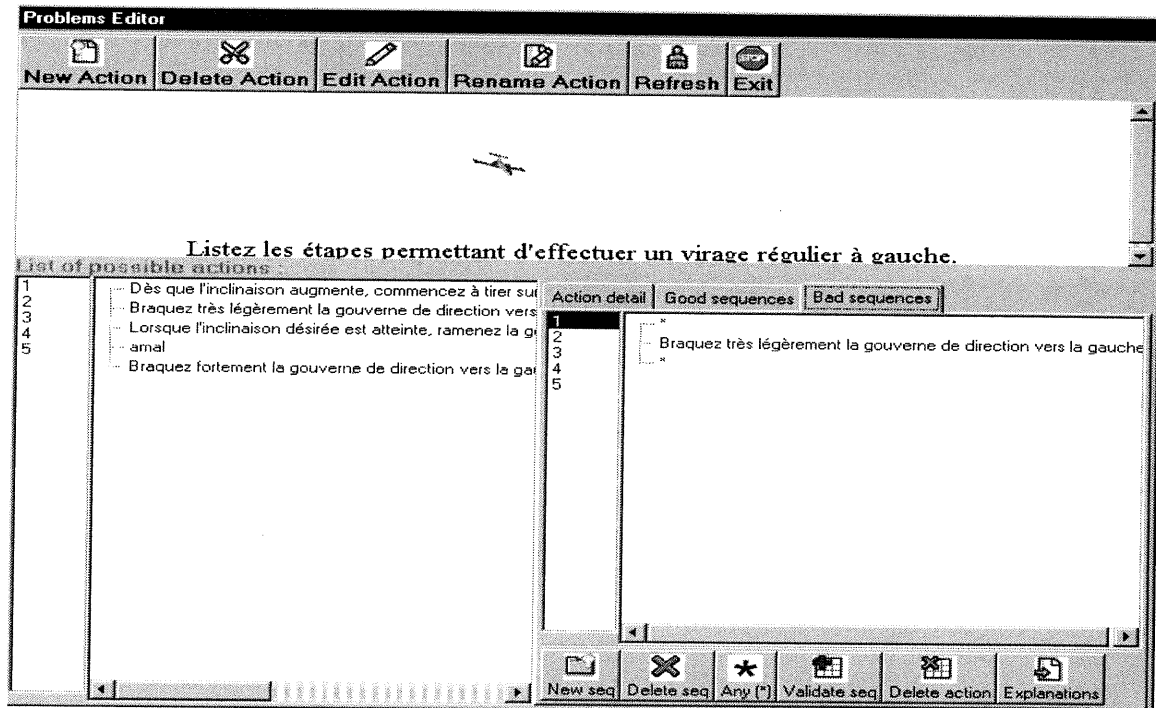


Figure 7 : Éditeur de problèmes à étapes

5.3.3 Création d'explications

Les explications sont créées dans un éditeur d'explications. Elles peuvent se présenter sous forme textuelle, ou sous forme de pages web. Ces pages peuvent donc contenir des images, des vidéos, et des simulations en réalité virtuelle. Nous devons ici souligner que le concepteur peut aussi bien réutiliser des pages web précédemment créées par lui-même qu'utiliser des pages créées par d'autres concepteurs. C'est ce qui nous amène au concept de réutilisation des connaissances.

5.3.4 Réutilisation des connaissances

L'un des aspects importants du projet «Enseignement à distance» réside dans la réunion du travail de plusieurs concepteurs dans une même base de connaissances. Les concepteurs peuvent ainsi collaborer sur un même cours ou réutiliser des parties déjà développées par d'autres concepteurs dans leur propre cours. Rouane [Rouane, 98] parle de *base universelle des connaissances*.

Nous allons maintenant détailler chacun des composants de l'architecture globale du système.

5.3.5 Composants de l'environnement d'édition

Le serveur comporte :

5.3.5.1 Le modèle du domaine

Il se compose de tous les cours et exercices disponibles. Chaque cours peut être représenté sous forme de réseau sémantique, avec ses pré-requis et ses parties constitutives (sous forme d'unités cognitives).

5.3.5.2 Le serveur d'agents

Il sert à envoyer deux des agents présentés dans l'architecture globale (Agent planificateur, Agent explicatif) sur la machine de l'apprenant, lorsque ce dernier se connecte pour une session d'apprentissage. Nous parlerons plus en détail de ces agents dans l'environnement d'apprentissage.

5.3.5.3 Le modèle de l'apprenant

Les principes sur lesquels nous nous sommes basés pour notre modèle de l'apprenant sont spécifiés dans l'environnement d'apprentissage (section 5.4.2). Toutefois, c'est au niveau de l'environnement d'édition que nous devons spécifier les différents niveaux d'apprenants possibles, car ils sont liés au concept d'unité cognitive.

Notre réflexion sur les niveaux d'apprenants est passée par deux étapes principales :

- nous avons tout d'abord pensé à utiliser la terminologie novice-intermédiaire-expert. Mais cette dernière ne nous paraissait pas satisfaisante parce que limitée. En effet, plusieurs questions se posent dans le cadre de cette terminologie :
 - comment définir un niveau débutant pour tout un cours, à quel moment peut-on dire que l'on passe d'un niveau débutant à un niveau intermédiaire ou expert ?

- ne peut-on être débutant dans une partie du cours seulement, mais intermédiaire ou expert dans une autre partie de ce même cours ?
- quelle est la frontière entre un débutant et un intermédiaire, un intermédiaire et un expert ?

Toutes ces questions nous ont poussé à trouver une terminologie plus claire.

- Nous avons finalement décidé que c'était au concepteur de définir ces niveaux d'apprenants. Ainsi, pour chaque unité cognitive, le concepteur doit définir différents niveaux de maîtrise de l'unité cognitive, ces différents niveaux devant représenter les étapes dans le processus de compréhension total de l'unité cognitive en question.

Le niveau d'un apprenant n'est donc pas défini dans un cours global, mais plutôt par unité cognitive. Des paramètres existent toutefois pour calculer sa performance globale, en fonction de ces différents niveaux.

5.3.5.4 L'éditeur d'explications

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'éditeur d'explications (Figure 8⁴) permet d'introduire les différentes explications à utiliser dans le système. Le fait que les explications puissent contenir des images, des vidéos, et des simulations virtuelles permet d'enrichir leur contenu en les rendant plus concrètes, et peut-être plus compréhensibles.

⁴ Réalisé par Khalid Rouane

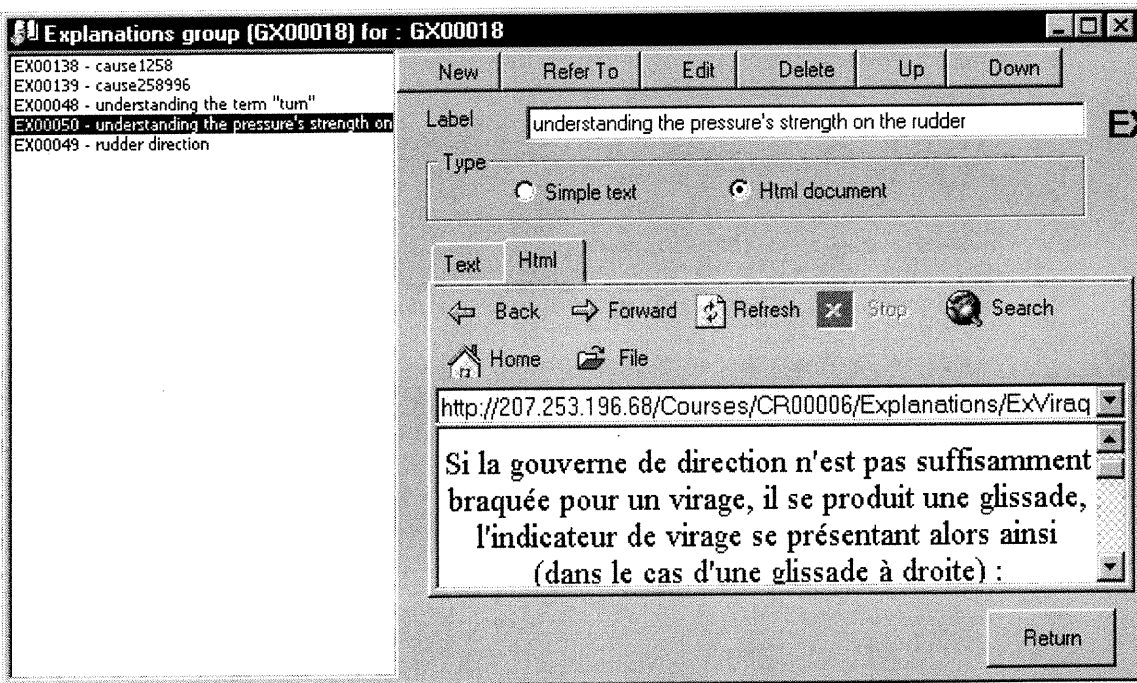


Figure 8 : Éditeur d'explications

5.3.5.5 La base de connaissance

Elle sert à stocker les cours, exercices et explications.

5.3.5.6 Le processus de recommandations

Il réfère aux différents conseils et recommandations que l'agent prodigue aux concepteurs de cours suite à une analyse de la base de connaissances. Ce processus sera détaillé un peu plus loin, dans la section « Présentation de conseils au concepteur » (section 5.9.4).

Nous allons maintenant présenter l'environnement d'apprentissage.

5.4 L'environnement d'apprentissage

Nous allons détailler chacun des composants de l'architecture de base de notre STI.

5.4.1 Le module expert

Ce module regroupe toute la connaissance liée aux différents cours à enseigner. Cette connaissance est structurée en unités cognitives et en concepts (c'est la modélisation adoptée). Chaque unité cognitive peut avoir différents niveaux de difficultés que l'apprenant doit maîtriser. Cette progression est effectuée au moyen de la résolution de différents types d'exercices, devant valider la connaissance acquise dans l'unité cognitive.

La structure globale d'un cours est présentée sous la forme d'un arbre d'unités cognitives et de concepts (c'est une représentation en réseaux sémantiques).

5.4.2 Le modèle de l'apprenant

Le modèle de l'apprenant est un modèle de perturbation (*perturbation model*) et plus précisément, un modèle d'anomalie (*bug model*). Un modèle de perturbation combine le modèle standard de recouvrement des connaissances avec une représentation de la connaissance erronée.

Nous avons opté pour ce type de modèle parce qu'il permet une analyse plus fine des actions de l'apprenant. Ainsi que nous l'avons évoqué au chapitre 2, c'est le type de modèle de l'apprenant le plus évolué car il permet de définir :

- les connaissances que l'apprenant connaît à un moment donné ;
- les connaissances non encore présentées à l'apprenant ;
- les connaissances erronées de l'apprenant ;

La technique communément adoptée pour implanter un modèle de perturbation consiste à représenter les connaissances de l'expert et à ajouter à cette représentation les erreurs probables [Holt *et al.*, 91]. Dans notre système, le concepteur doit élaborer une librairie d'erreurs pour chaque exercice, en énumérant un ensemble d'erreurs qu'il a remarquées précédemment, en se basant sur son expérience. C'est ce qui est représenté dans les problèmes à étapes par la notion de « bad sequence » à laquelle le concepteur peut associer une ou plusieurs explications.

Cette librairie peut être étendue grâce aux observations de l'agent visant à découvrir de nouveaux « patrons » d'erreurs, c'est-à-dire des erreurs qui n'auraient pas été prévues au départ, mais qui se révéleraient comme étant fréquemment commises.

Nous devons toutefois souligner que ces nouvelles erreurs sont d'abord soumises au concepteur qui doit décider si elles doivent être ajoutées dans la librairie d'erreurs ou pas.

Le modèle de l'apprenant se compose de toutes les statistiques liées à l'apprenant : ses performances, les explications qui lui ont été présentées, les erreurs non prédéfinies, les graphes conceptuels qu'il a construits pour les explications incomprises (ce point sera détaillé plus tard) et son score dans chaque exercice, initialisé à 100 points au départ.

A chaque erreur, un certain nombre de points sont déduits du score. Il est important de mentionner qu'il y a une différence dans notre manière de sanctionner les erreurs, selon qu'une explication est disponible ou pas. En effet, nous considérons que les erreurs prévues sont des erreurs typiques, impliquant plus de pénalités pour l'apprenant. Ceci peut également signifier que le fait de faire appel à l'agent explicatif est plus sévèrement « puni », ce qui incite l'apprenant à peser mûrement ses réponses.

Lors de l'initialisation du modèle de l'apprenant, ce dernier indique ce qu'il pense être son niveau pour chaque unité cognitive, et c'est à partir de ces informations initiales que l'agent explicatif peut commencer son travail. De cette façon, nous dotons notre agent de croyances initiales, qui évoluent en fonction des performances de l'apprenant.

5.4.3 L'environnement d'enseignement

Dans notre système, l'environnement d'enseignement est représenté par le module de dialogue. Il se compose de l'environnement de cours et d'exercices.

Le module de dialogue interagit avec l'apprenant lors de chaque session d'apprentissage :

- en initialisant le dialogue : lors de chaque session d'apprentissage, la structure du cours à présenter ainsi que les agents intelligents sont téléchargés sur la machine de

l'apprenant. Le concepteur n'a donc pas à se soucier de la distribution et de la maintenance des copies du contenu de l'enseignement, contrairement à ce qui se passe dans les systèmes d'enseignement à distance dans leur acception traditionnelle. Seule sa version originale, localisée sur le serveur, doit être mise à jour;

- en permettant de créer ou de mettre à jour le modèle de l'apprenant (en faisant appel à l'agent modèle de l'apprenant) ;
- en prenant en charge le processus de communication avec l'apprenant.

Ce processus de communication se traduit essentiellement par la présentation de la structure globale du cours à enseigner, et l'attente des actions de l'apprenant devant susciter différentes interactions :

- choix de la prochaine unité cognitive à enseigner ;
- enclenchement du processus de détermination du niveau de l'apprenant ;
- détermination du prochain exercice à résoudre ;
- enclenchement des processus du module pédagogique.

5.4.4 Le module interface

Notre interface est une interface Windows standard. Nous avons mentionné que l'interface d'un STI doit véhiculer des concepts familiers à l'apprenant. C'est pourquoi nous avons adopté la structure de cours décrite plus haut, qui se rapproche de celle de l'enseignement traditionnel, et qui, de ce fait, ne doit normalement pas susciter des incompréhensions supplémentaires. La présentation de cette structure sous une forme arborescente est également familière aux apprenants. Elle adopte le paradigme présent dans de nombreux systèmes d'aide (par exemple, la forme de la rubrique d'aide dans les logiciels Microsoft), à savoir une structure arborescente contenant les différentes unités cognitives du cours, et un navigateur de cours sur la droite, permettant l'affichage des ressources Web.

Par ailleurs, les différents types d'exercices existant dans notre système (exercices à choix multiples, exercices à choix multiples multiples, textes à compléter, problèmes à étapes, etc.) sont généralement connus des apprenants. La manière de les présenter rejoint celle qu'ils ont l'habitude de rencontrer.

La figure 9 représente le présentateur de problèmes à étapes.

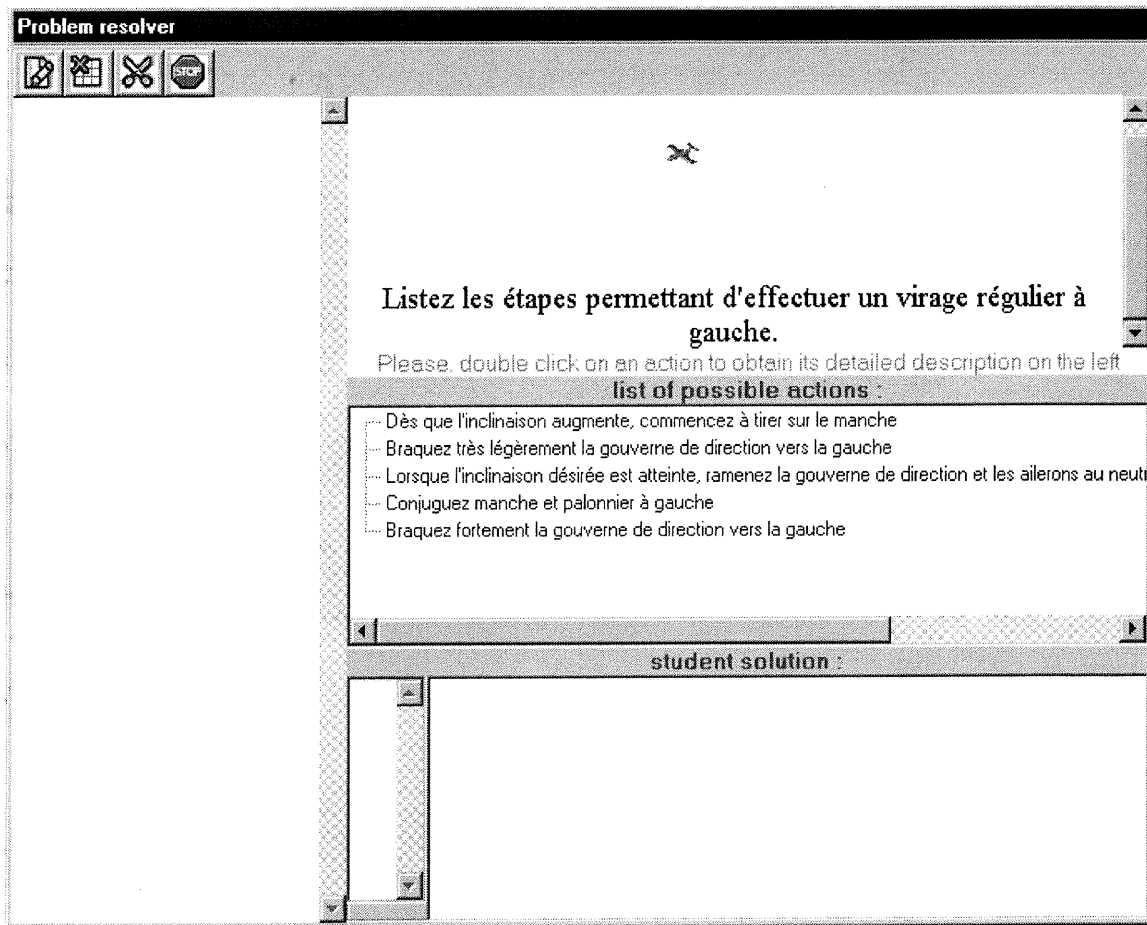


Figure 9 : Présentateur de problèmes à étapes

5.4.5 Le module pédagogique

Il permet de contrôler la présentation du contenu à l'apprenant, et de déterminer quand les apprenants ont besoin d'aide, ainsi que le type d'aide requis.

Le module pédagogique est constitué par trois agents intelligents.

5.4.5.1 L'agent planificateur

Globalement, l'agent planificateur se charge de la progression de l'apprenant dans le cours et de la chronologie des tâches ou activités devant être effectuées par l'apprenant. En effet, lorsqu'une unité cognitive est comprise par l'apprenant (compréhension que nous testons au moyen d'exercices), ce dernier peut passer à l'unité cognitive suivante.

Sinon, il est en quelque sorte rétrogradé à l'unité cognitive précédente jusqu'à réussite complète de l'unité cognitive ;

5.4.5.2 L'agent modèle de l'apprenant

Il se charge de l'initialisation et de la mise à jour du modèle de l'apprenant et est en communication constante avec les deux autres agents ;

5.4.5.3 L'agent explicatif

Nous allons nous focaliser sur cet agent (Figure 10) .

- son rôle consiste en l'apport d'explications lorsque l'apprenant semble avoir des difficultés de compréhension, que ce soit dans le processus d'enseignement du cours ou dans la résolution d'exercices ;
- l'agent explicatif a également pour tâche de repérer les incompréhensions de l'apprenant liées aux explications qui lui ont été présentées. Il peut ainsi identifier les bonnes et mauvaises explications, et informer le concepteur des incompréhensions de l'apprenant liées aux mauvaises explications, ces incompréhensions étant décelées au moyen de la construction de graphes conceptuels ;
- enfin, l'agent explicatif a pour rôle de détecter de nouveaux patrons d'erreurs, non prévus initialement par le concepteur, ce qui permet d'enrichir la base de connaissances puisque de nouvelles explications sont normalement élaborées par le concepteur pour pallier à ces nouveaux problèmes ;

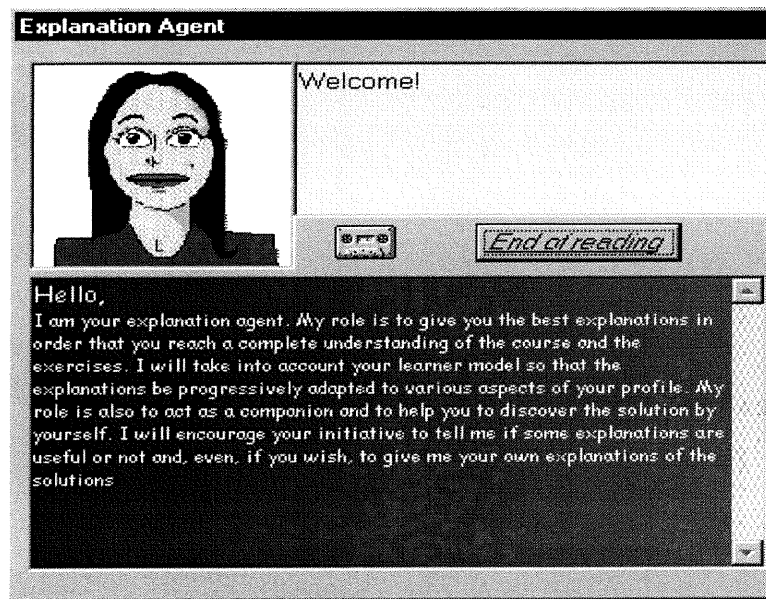


Figure 10 : Interface de l'agent explicatif

De façon générale, le module pédagogique est ainsi capable :

- de guider l'apprenant dans son processus d'apprentissage ;
- de prodiguer des explications lorsqu'un apprenant est dans une situation de blocage ;
- d'assister effectivement l'apprenant en cours de résolution de problèmes ;
- d'offrir à l'apprenant de revoir son processus de résolution ;
- de réagir positivement ou négativement aux réponses de l'apprenant.

Par ailleurs, nous avons évoqué, au chapitre 2, au niveau des systèmes d'apprentissage adaptatifs basés sur le Web, différentes techniques permettant une adaptation du système à l'apprenant. Dans le module pédagogique, trois de ces techniques ont été employées : la planification du curriculum, l'analyse intelligente des réponses de l'apprenant, et enfin, l'aide interactive à la résolution de problèmes.

Nous allons maintenant nous focaliser sur l'agent explicatif.

5.5 L'agent explicatif

5.5.1 Contexte et but

Beaucoup de systèmes tutoriels intelligents ont essayé de générer automatiquement des explications par des mécanismes à base de règles, par du raisonnement à base de cas, ou en utilisant des hiérarchies d'objet... A ce sujet, nous pouvons mentionner le système Cosmo [Elliot, 97][Lester *et al.*, 98] qui produit des explications et coordonne le discours et les actions de l'agent en fonction des réponses de l'apprenant. Beaucoup d'autres chercheurs ont également travaillé à la génération d'explications comme Khan *et al.* [Khan *et al.*, 98], Metzler *et al.* [Metzler et Martincic, 98].

En revanche, très peu de travaux sont orientés vers l'évaluation de l'efficacité des explications. Par efficacité des explications, nous entendons l'utilité ou le plus qu'elles ont apporté pour favoriser la compréhension de l'apprenant et l'aider dans ses blocages en cours de résolution d'exercices. Notre recherche se focalise donc sur ce point, car nous pensons qu'un STI doit pouvoir évaluer l'efficacité des explications présentées, cette évaluation étant nécessaire pour mesurer à terme son efficacité globale. Par ailleurs, cette approche est plus proche du processus d'enseignement avec un professeur humain. En effet, en situation réelle, ce dernier peut mesurer immédiatement les effets de ses explications sur la compréhension de l'apprenant, et les adapter s'il y a un problème. Notre but, ici, est de créer un agent avec cette caractéristique.

Le processus de compréhension peut être généralement perçu dans des situations de résolution de problèmes. En effet, l'apprenant intègre les diverses connaissances qui lui ont été transmises lors d'un enseignement en créant des liens entre ces connaissances. Notre ambition est de détecter si ces interconnexions sont correctes, et, le cas échéant, de trouver l'origine de l'incompréhension. Toutefois, ce problème est complexe, et paraît quasiment insurmontable si l'on s'attaque directement à un cours dans son ensemble. Il nous paraît plus raisonnable de nous focaliser sur une petite partie des connaissances, à savoir une explication portant sur un point déterminé, et de tenter de comprendre les points précis de l'incompréhension afin de pouvoir y remédier. Nous formulons

l'hypothèse que l'analyse des raisons de l'incompréhension à un niveau micro peut contribuer au problème de compréhension du contenu en général.

Notre approche vise à assister l'apprenant aussi bien directement qu'indirectement. En effet, l'agent intervient à différents niveaux dans l'architecture globale du projet :

- il intervient directement dans l'environnement d'apprentissage en fournissant à l'apprenant des explications adaptées à son modèle d'apprenant;
- il intervient dans l'environnement d'édition, en présentant au concepteur ses conclusions quant à l'efficacité de ses explications, et en lui fournissant des conseils pour les améliorer.

Pour effectuer ces déductions, l'agent explicatif utilise la théorie des graphes conceptuels. Ce qui nous amène à décomposer le processus d'explication en deux étapes :

- afin d'aider le concepteur de cours à produire des explications efficaces, nous lui fournissons un ensemble d'outils permettant de structurer l'explication sous forme de concepts et de liens, et aboutissant à une représentation visuelle basée sur les graphes conceptuels.
- afin de détecter les problèmes dans la compréhension de l'apprenant, nous lui offrons la possibilité de donner sa propre interprétation de l'explication, en indiquant les concepts importants ainsi que leurs interdépendances, et ce, en utilisant également les graphes conceptuels.

Grâce à cette base d'information, l'agent explicatif peut utiliser les structures de graphes conceptuels pour effectuer ses déductions, et aider ainsi le concepteur à améliorer la qualité de ses explications et le contenu de son cours, et ce faisant, apporter une aide indirecte à l'apprenant.

Ces points seront détaillés plus loin.

5.5.2 Caractéristiques de l'agent explicatif

Notre agent explicatif est un agent intelligent car il cadre, selon nous, avec la définition adoptée par Ferber [Ferber, 97], présentée au chapitre 4, et qu'il dispose des caractéristiques suivantes propres aux agents : la réactivité, la mobilité, l'autonomie, l'apprentissage, la déduction et la crédibilité. Nous allons détailler ces caractéristiques.

5.5.2.1 La réactivité

Le principe de la réactivité décrit la capacité qu'a un agent de percevoir son environnement, (le monde physique, un utilisateur par le biais d'une interface graphique, d'autres agents, Internet...), et de changer de comportement selon les événements qui y surviennent. Il a ainsi une capacité réactive tout comme, nous autres humains, avons la faculté de réagir immédiatement suite à une perception visuelle, auditive, etc. L'agent explicatif réagit aux actions de l'apprenant par l'intermédiaire de l'interface de l'environnement d'apprentissage.

5.5.2.2 La mobilité

Le principe de mobilité décrit la capacité qu'ont les agents de se déplacer dans un réseau électronique. L'agent explicatif se déplace au début d'une session d'apprentissage du serveur de cours vers le poste de l'apprenant. Ainsi, ce dernier obtient toujours la dernière version de l'agent explicatif, et par conséquent il bénéficie d'une amélioration de l'agent d'une façon transparente et immédiate.

5.5.2.3 L'autonomie

Le principe d'autonomie indique la capacité qu'ont les agents de fonctionner sans interposition directe d'autres agents (humains ou autres). Ils ont ainsi un certain contrôle sur leurs actions et sur leur état interne. En effet, l'agent explicatif est complètement autonome dans le processus d'explication.

5.5.2.4 L'apprentissage et la déduction

Le principe d'apprentissage et de déduction indique la possibilité qu'ont les agents d'adapter leur comportement selon l'historique des performances de l'apprenant. Ils

peuvent ainsi analyser les actions de ce dernier, se rappeler ses activités passées, et ainsi suggérer de meilleures stratégies, prédire un comportement possible et prodiguer des conseils à l'apprenant en fonction de ces paramètres. Dans notre système, l'agent explicatif prodigue des conseils non seulement à l'apprenant mais également au concepteur.

5.5.2.5 La crédibilité

La notion d'agent pédagogique de façon générale a permis de s'intéresser à l'aspect de la personnification du tuteur dans un STI. En effet, l'apprenant ne reçoit pas seulement des explications émanant d'un système informatique, il est surtout aidé par un personnage, qu'il peut identifier à un professeur en chair et en os, et qui a une représentation visuelle.

L'introduction des agents pédagogiques animés dans des environnements d'apprentissage a ainsi permis d'améliorer la résolution de problèmes et l'efficacité de l'apprentissage. Le but primaire des agents pédagogiques animés est de guider l'apprenant durant toute une session d'apprentissage et de lui fournir un support pédagogique approprié. Pour mener à bien cette tâche, ils doivent combiner des comportements explicatifs adaptatifs avec une forte présence visuelle [Lester *et al.*, 97]. En effet, les humains s'attendent à un certain degré d'émotion dans leur contact avec d'autres humains. Aussi, les agents pédagogiques doivent-ils posséder certaines des réactions et des comportements que l'on observe dans les rapports sociaux humains. Il est important de souligner que cette apparence doit être en accord avec le contenu pédagogique qu'ils délivrent. Leurs explications doivent donc être «situées», ce qui signifie qu'elles doivent être dispensées dans des contextes concrets d'apprentissage et sembler raisonnables.

L'agent explicatif est présenté sous forme d'un personnage en deux dimensions, qui a la capacité de parler à l'apprenant et qui adapte ses expressions et actions selon les actions de ce dernier. Cette adaptation n'est toutefois pas extrêmement sophistiquée puisque les différentes expressions et situations possibles sont prévues à l'avance. Pour que notre agent puisse parler, nous avons utilisé l'API Microsoft Speech SDK.

5.5.3 Architecture de l'agent explicatif

L'architecture de l'agent explicatif (Figure 11) est basée sur celle des agents cognitifs [[Frasson *et al.*, 98][Frasson *et al.*, 97][Frasson *et al.*, 96]]. Ces derniers ont été définis comme étant des agents réactifs, ayant la capacité d'apprentissage, adaptatifs et cognitifs : ils réagissent à l'activité d'autres agents et peuvent apprendre.

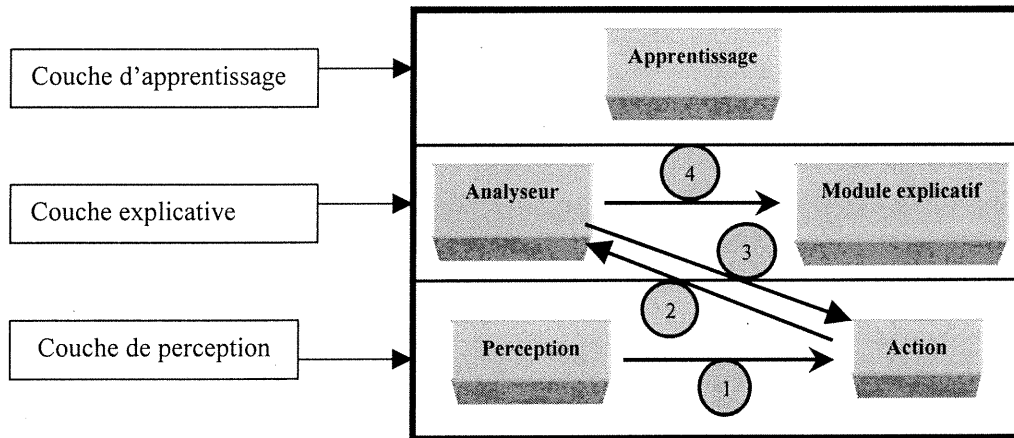


Figure 11 : Architecture de l'agent explicatif

5.5.3.1 La couche de perception

Elle représente la partie réactive de l'agent et est employée à détecter les actions de l'apprenant : demande d'explication, soumission d'une réponse, fin de lecture d'une explication, etc. Elle est formée de deux composants :

- le module de perception : il indique que le système a une entrée, ce qui signifie que l'apprenant a exécuté une action. Il déclenche alors le module d'action (1) ;
- le module d'action : il détermine le type de l'action qui a été exécutée, selon le contexte de l'apprenant (cours ou exercice). Il appelle ensuite l'analyseur (2).

5.5.3.2 La couche explicative

Elle est formée de deux composants :

- l'analyseur : quand une action est détectée, l'analyseur est déclenché pour chercher une explication si l'apprenant est dans le contexte d'un cours, ou pour

vérifier la solution d'un exercice si l'apprenant est dans le contexte de résolution d'un exercice. Si la solution est correcte, l'agent félicite l'apprenant (3). Autrement, si la solution est incorrecte mais qu'aucune explication n'est disponible, l'agent informe l'apprenant de son incapacité à l'aider (3)(Figure 12). Si la solution est incorrecte, et qu'une ou plusieurs explications sont disponibles, le module explicatif est déclenché (4).



Figure 12 : l'agent explicatif ne peut présenter d'explications

- le module explicatif : il contrôle tout le processus des explications, ainsi que la manière dont elles sont présentées à l'apprenant.

Nous avons précédemment dit que des explications doivent être «situées» pour que l'agent soit crédible. Pour cette raison, quand une erreur se produit, l'agent n'essaye pas de découvrir implicitement la cause de l'erreur. Il propose plutôt à l'apprenant une liste de causes possibles pour l'erreur (déterminées par le concepteur du cours), ordonnées selon leur probabilité d'être choisies, cette probabilité étant calculée selon le nombre d'apprenants de même profil ayant précédemment choisi cette cause d'erreur (Figure 13).

L'agent attend donc que l'apprenant lui indique ce qui doit lui être expliqué. Sans cette information supplémentaire et parce que les origines d'une erreur peuvent être innombrables, l'explication pourrait être totalement déplacée et impropre au contexte.

L'explication relative au choix de l'apprenant est ensuite présentée (Figure 14, Figure 15). Si ce dernier n'arrive pas à cerner ce qu'il ne comprend pas, la cause

la plus probable de l'erreur est choisie par l'agent et l'explication correspondante présentée.

Nous tenons à souligner que notre agent utilise un ensemble d'allocutions prédéfinies selon l'état de l'environnement. Il possède également un répertoire d'expressions (heureux, neutre, triste, fâché...) qui changent en fonction des événements qui se produisent lors de l'apprentissage, ce qui lui confère une cohérence visuelle.

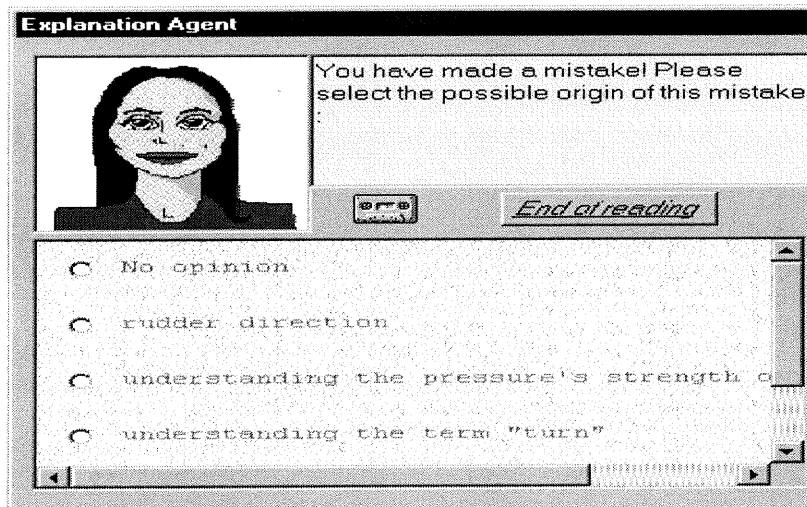


Figure 13 : Présentation des causes d'erreur par l'agent explicatif



Figure 14 : Présentation de l'explication suite à la sélection de l'apprenant

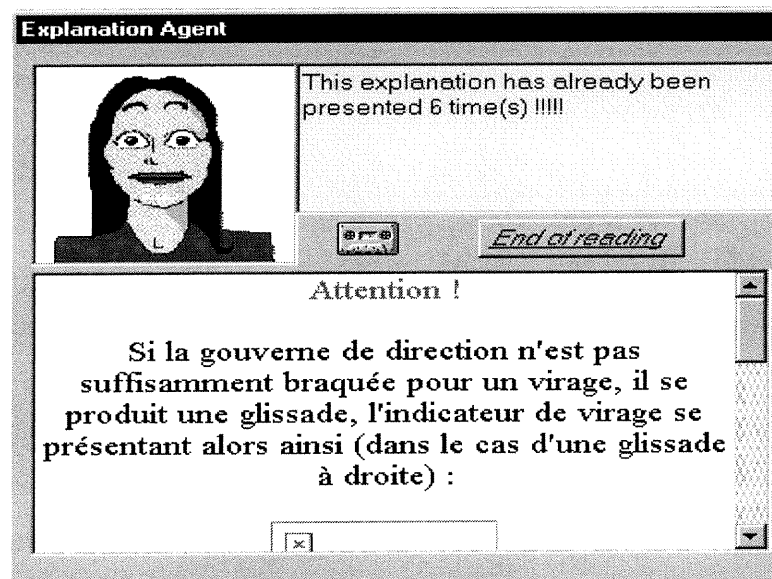


Figure 15 : Répétition dans la présentation d'une explication

5.5.3.3 La couche d'apprentissage

Dans la couche d'apprentissage, deux caractéristiques essentielles de l'agent ont été implantées : l'observation et la déduction.

- l'agent observe les causes les plus fréquentes des erreurs faites par des apprenants d'un certain profil, et il génère des croyances basées sur ces observations.

- il peut alors présenter les causes les plus probables de l'erreur, ordonnées selon leur fréquence.
- de plus, l'agent explicatif a pour fonction de comparer les graphes conceptuels du concepteur et ceux des apprenants, en se basant sur l'appariement des graphes conceptuels (matching). Il peut ainsi en déceler les différences et détecter les points précis d'incompréhension (c'est ce qui va être présenté en détail dans la section 5.9 Détection des points d'incompréhension dans une explication).
- enfin, l'agent explicatif doit essayer de détecter de nouveaux « patrons » d'erreurs, afin d'enrichir la librairie des erreurs et d'aboutir à un système explicatif encore plus performant.

La couche d'apprentissage se charge également d'évaluer la qualité des explications. L'agent explicatif peut déduire quelles explications sont bonnes ou mauvaises pour un profil d'apprenant, en utilisant l'index de la qualité des explications.

La prochaine section présente notre manière d'appréhender le domaine des explications.

5.6 Les explications

5.6.1 Principes généraux

Notre manière de traiter le problème des explications repose sur une coopération entre le concepteur du cours, l'agent explicatif et l'apprenant, et a comme objectif une amélioration constante dans la compréhension de l'apprenant.

Concernant les explications, un ensemble de choix conceptuels ont été faits :

- le problème de l'efficacité des explications dans un STI étant crucial, il nous semble plus opportun de fournir au système des explications créées par un concepteur humain plutôt que générées dynamiquement. C'est donc pour **une génération statique des explications** que nous avons opté ;
- toutefois, pour introduire un aspect dynamique, et parce que nous pensons qu'il est nécessaire que les connaissances du système soient évaluées, et éventuellement

corrigées, nous avons introduit un mécanisme de **déduction de l'efficacité des explications** basé sur la comparaison de graphes conceptuels;

- comme c'est au concepteur de cours de fournir ses explications, il est libre d'indiquer quelles explications présenter à chaque niveau d'apprenant. C'est pourquoi **l'adaptation des explications** est liée au concepteur de cours, qui peut choisir de les présenter en fonction du niveau courant de l'apprenant, en fonction du type de connaissances qu'il est sensé maîtriser à un moment donné, etc. Le concepteur peut également choisir de fournir des niveaux de détails différents pour l'explication d'un concept donné, etc. S'il est vrai que le concepteur est libre dans ses choix conceptuels, il existe cependant un garde-fou : le système est en effet capable de démontrer l'efficacité ou non de l'explication présentée, et d'en aviser le concepteur afin qu'il puisse remédier à tout problème ;
- l'existence de deux grands types d'explications dans notre projet :
 1. les explications liées au contenu, qui sont essentiellement des explications de concepts ;
 2. les explications liées aux exercices, qui sont présentées en cours de résolution ;
- l'utilisation de la technique «Canned Text » dans les explications liées au contenu, puisque à chaque concept (mot-clé), une explication est associée, l'apprenant n'ayant qu'à cliquer sur les concepts pour la visualiser. Il reste à souligner que cette sorte d'explications est reliée au contexte, puisqu'un apprenant ne peut lire l'explication d'un concept que dans le cadre de l'unité cognitive dans laquelle il est défini ;

Nous avons implanté tous ces principes que, pour des raisons de confidentialité industrielle, nous ne pouvons détailler amplement ici.

5.6.2 Présentation des explications

L'agent explicatif peut présenter des explications dans le processus de présentation de cours aussi bien que dans la résolution d'exercices.

Il a un comportement réactif lors de la présentation du cours puisqu'il apparaît quand une demande d'explication est clairement formulée par l'apprenant, alors que son

comportement est autonome dans les situations de résolution de problèmes. En effet, il peut apparaître pour fournir une explication lorsqu'une erreur prévue par le concepteur est commise, pour présenter des excuses s'il est dans l'impossibilité de fournir une explication, et enfin pour exprimer son mécontentement ou sa satisfaction, selon les actions de l'apprenant.

5.6.3 Qualité des explications

Basée sur le principe que plus une explication est présentée à un même apprenant (c'est-à-dire qu'il commet la même erreur plusieurs fois de suite et qu'il sélectionne toujours la même cause d'erreur), plus l'explication semble inutile, la qualité d'une explication est jugée selon le nombre de fois où elle a été présentée. Cela nous mène à la formule suivante :

$$Q_e = L_e / E$$

Où: Q_e : index de qualité de l'explication e avec $Q_e \in] 0,1]$

L_e : Nombre d'apprenants auxquels l'explication e a été présentée

E : Nombre de présentations de l'explication e

Plus le rapport est faible, plus l'explication est jugée de mauvaise qualité. Par cette règle, nous voulons montrer qu'une explication ne peut pas être considérée comme étant « bonne » s'il est nécessaire que les apprenants la relisent plusieurs fois de suite, sans pour autant résoudre leur problème.

Par ailleurs, $Q_e \in] 0,1]$ pour les raisons suivantes : un nombre d'apprenants égal au nombre de présentations de l'explication e est la meilleure « performance » possible pour l'explication en question. En effet, cela veut dire qu'elle n'a pas à être présentée plus d'une fois, et que donc elle est comprise du premier coup. D'où la borne 1. D'un autre côté, l'explication e doit être présentée au moins une fois pour que sa qualité puisse être déterminée. C'est pourquoi le 0 n'appartient pas au domaine de définition de Q_e . Plus Q_e tend vers 0, plus l'explication est jugée de mauvaise qualité.

Nous allons maintenant aborder notre manière de structurer les explications.

5.6.4 Structuration des explications

Trouver un formalisme de représentation des connaissances dans un système explicatif est nécessaire. Dans le cas des systèmes de génération d'explications, ce formalisme est utilisé directement dans la génération (ainsi que nous l'avons indiqué dans la section techniques explicatives). Dans le cas des systèmes où les explications sont directement fournies par le concepteur, un formalisme de représentation peut être utilisé à d'autres fins, ainsi que nous allons le voir dans cette section.

Nous allons présenter les différents formalismes de représentation des connaissances possibles [Luger et Stubblefield, 98].

5.6.4.1 Les représentations logiques

Cette classe de représentations utilise des expressions en logique formelle afin de représenter la base de connaissances. Des règles d'inférence appliquent cette connaissance à des instances de problèmes. La logique des prédicats est la représentation logique la plus usitée.

5.6.4.2 Les représentations procédurales

Ces dernières représentent la connaissance comme un ensemble d'instructions devant servir à résoudre un problème, ce qui contraste avec les représentations déclaratives des réseaux logiques et sémantiques. Un système de production peut être vu comme un exemple de la représentation procédurale.

5.6.4.3 Les représentations basées sur les réseaux

Ces représentations capturent la connaissance sous forme de graphes dans lesquels les nœuds représentent les objets ou les concepts du domaine, et les arcs les relations ou associations entre eux. Dans les représentations en réseaux, on peut citer les réseaux sémantiques, les dépendances conceptuelles, et les graphes conceptuels. Ces derniers ont d'ailleurs été utilisés dans le cadre du présent projet.

5.6.4.4 Les représentations structurées

Ces types de représentations étendent les réseaux en permettant à chaque nœud de représenter une structure de données complexe. Des exemples de représentations structurées incluent les scripts, les « frames », et les objets.

Nous allons nous focaliser sur les représentations basées sur les graphes conceptuels.

5.6.4.5 Introduction aux graphes conceptuels

Selon Sowa [Sowa, 91], les graphes conceptuels sont un système de logique permettant de représenter la sémantique du langage naturel. Les graphes conceptuels sont proposés par Sowa comme un formalisme universel de représentation des connaissances. Les graphes conceptuels ont été créés afin de simplifier le passage de et vers les langages naturels. Ils sont basés sur une notation graphique développée tout d'abord par C.S. Peirce.

Selon Kabbaj [Kabbaj, 96], «Un graphe conceptuel est un ensemble de concepts connectés par des relations conceptuelles n-adiques. Un concept est une spécification typée d'un référent : [TYPE : Référent], et un référent peut être une instance particulière, une variable, un ensemble ou un graphe conceptuel. Si un référent est une variable, on peut l'omettre et spécifier uniquement le type du concept».

Exemple de graphe conceptuel [Kabbaj, 96] :

La proposition “la femme Valérie aime l'homme André qui est un ami de Jo et Valérie est mariée à Jo” se présente comme suit :

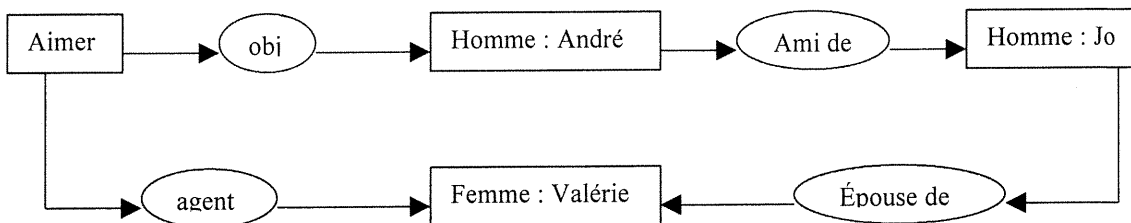


Figure 16 : Exemple de graphe conceptuel

Ainsi que l'on peut le remarquer, les concepts sont représentés par des rectangles et les relations par des ovals. Dans notre cas, les relations sont représentées par des labels directement sur les arcs, car nous ne traitons que les relations binaires [Kabbaj, 96].

Comme on le voit, la définition des graphes conceptuels insiste sur la facilité du passage du langage naturel vers les graphes conceptuels et vice-versa. Nos explications se présentant sous forme de langage naturel (pages web ou texte), et devant la nécessité d'analyser ce qui pourrait ne pas avoir été compris dans une explication, nous avons logiquement pensé à la théorie des graphes conceptuels. Par ailleurs, ainsi que l'a mentionné Sowa, les graphes conceptuels sont applicables à un large ensemble de domaines ayant trait à la représentation des connaissances, y compris les STI [Sowa, 92].

Les avantages de l'approche adoptée peuvent être résumés comme suit :

- fournir au concepteur une vue complète et concise de ce qu'il veut normalement expliquer;
- permettre à l'apprenant d'exprimer sa propre interprétation de l'explication, et ce faisant, de réfléchir à son sens profond en se concentrant sur sa structure. Par ailleurs, et c'est le plus important, ces graphes conceptuels permettent à l'agent explicatif de découvrir les incompréhensions de l'apprenant.

Pour réaliser cette approche, nous avons conçu un ensemble d'outils logiciels, destinés aux concepteurs de cours et aux apprenants.

5.6.5 Outils fournis au concepteur

5.6.5.1 L'éditeur de concepts

Nous avons tout d'abord développé et fourni au concepteur un outil d'extraction automatique de concepts (Figure 17). Pour réaliser cette extraction, nous nous sommes basés sur l'approche la plus simple utilisée dans les systèmes de recherche d'information [URL 12], à savoir une extraction basée sur une base de données de concepts. En effet, nous pensons qu'il n'est pas vraiment utile d'essayer de développer un outil performant

de recherche d'information, dans le sens où le concepteur doit avoir la plus grande part dans le travail d'extraction de concepts, et aussi en raison de la taille limitée des explications, qui ne nécessite pas une recherche plus poussée.

Une fois que la liste des concepts relatifs à une explication lui est fournie, le concepteur peut, s'il n'est pas complètement satisfait par les résultats du système, ajouter des concepts, effacer des concepts, ou modifier leur rang dans la liste selon sa propre perception;

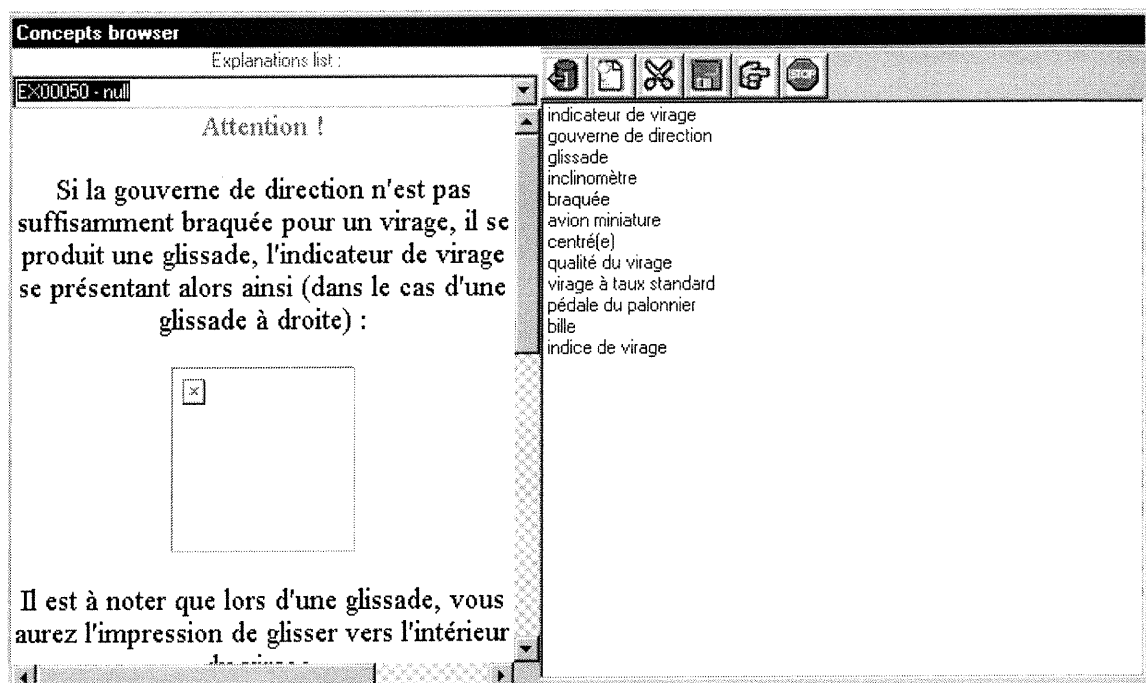


Figure 17 : Éditeur de concepts

5.6.5.2 L'éditeur de liens sémantiques

Nous avons ensuite implanté un outil pour l'édition des liens sémantiques entre concepts (Figure 18). Le concepteur doit ainsi appairer des paires de concepts parmi ceux qu'il a précédemment définis (contenus dans les listes des concepts sources et cibles les plus en haut dans l'outil), mais il a également la possibilité de créer un lien entre un concept qu'il a défini et un concept figurant dans la base de données (listes figurant au bas de l'outil).

Un exemple serait de définir le concept « virer » comme faisant partie de la liste des concepts clés d'une explication, et de vouloir le lier au concept « tourner » (figurant dans la base de données) comme étant un synonyme. Le concepteur aurait ainsi réutilisé un concept existant pour clarifier le sens de son explication et essayer de sonder la profondeur de compréhension de l'apprenant. En effet, si celui-ci omettait, dans son graphe conceptuel, de lier ces deux concepts, cela voudrait peut-être dire qu'il n'a pas réellement compris ce que signifiait le concept « virer ». Il serait alors possible au concepteur de construire une nouvelle explication, où il s'étendrait sur ce concept.

Nous avons également mis à la disposition du concepteur une classification de certains liens sémantiques importants. Ce sont des liens prédéfinis comme le lien « syn » par exemple, pour désigner le lien synonyme ou « comp » pour désigner le lien « est composé de », etc. Ce sont des liens susceptibles d'être utilisés fréquemment par la majorité des concepteurs, quelque soit le sujet de leur cours. Toutefois, le concepteur est également libre de créer de nouveaux types de liens, s'il considère qu'ils sont indispensables à la représentation de la sémantique de l'explication. Ainsi le concepteur peut soit créer ses propres liens basés sur sa propre perception de l'explication, soit réutiliser les liens figurant dans la base de données.

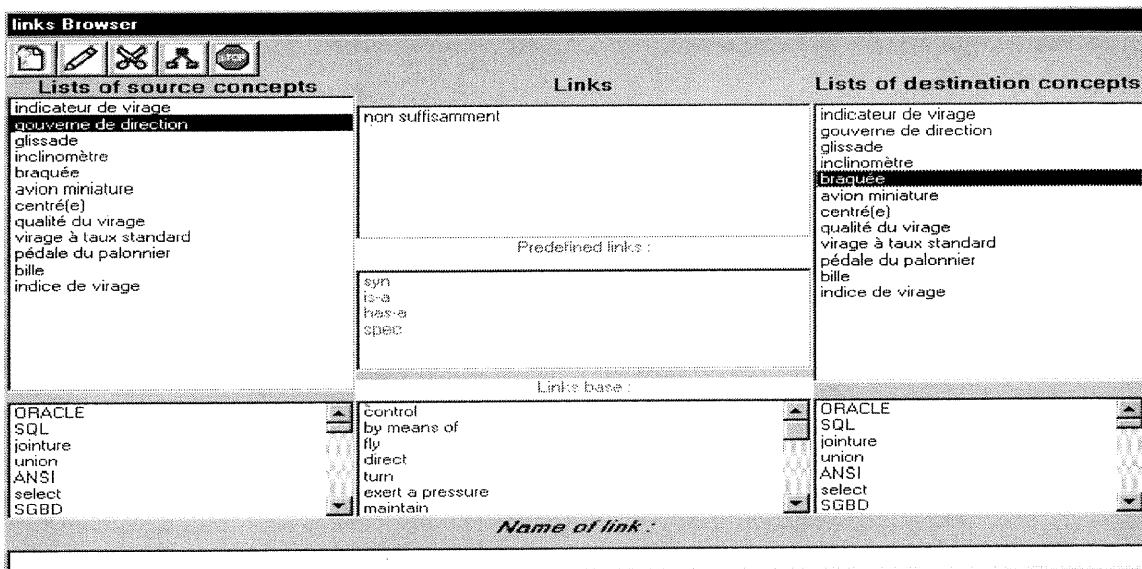


Figure 18 : Éditeur de liens sémantiques

5.6.5.3 L'outil de visualisation de graphes conceptuels

Nous avons également implanté un outil de visualisation des graphes conceptuels. En effet, après avoir défini tous les liens qu'il juge nécessaires, le concepteur peut ensuite demander au système de générer le graphe conceptuel correspondant, via cet outil.

Il obtient alors un graphe conceptuel comme le suivant (Figure 19).

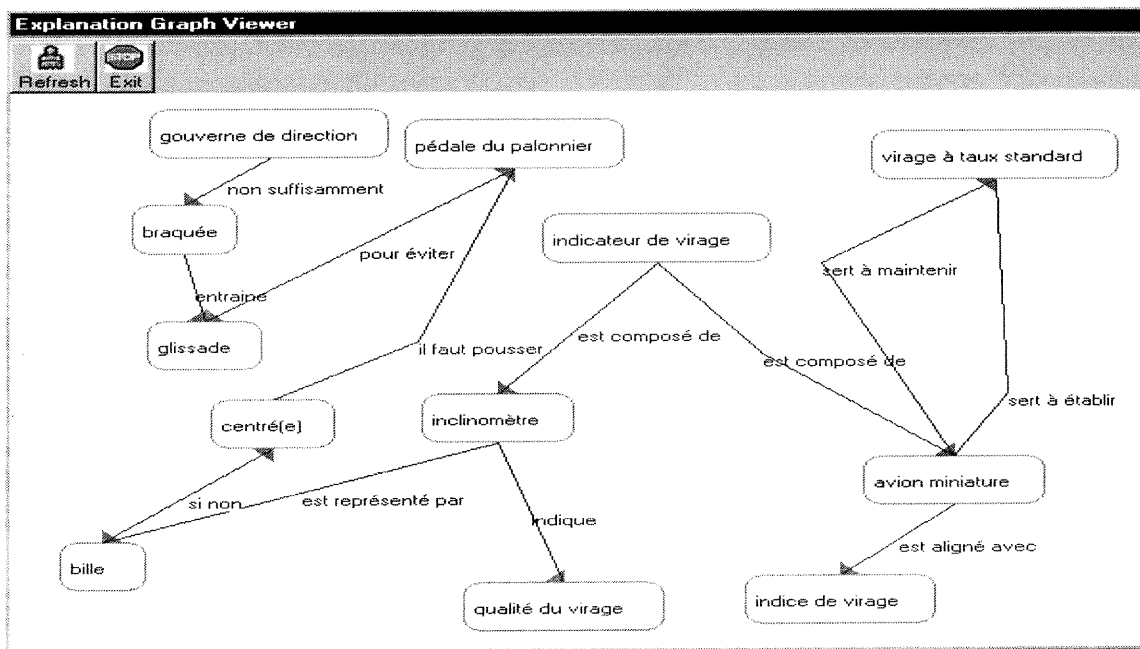


Figure 19 : Outil de visualisation de graphes conceptuels

Nous avons jusqu'à maintenant décrit les différentes étapes que doit suivre le concepteur pour la structuration des explications. Du côté de l'apprenant, nous avons précédemment souligné qu'il peut aider l'agent explicatif en lui fournissant des graphes conceptuels pour les explications qu'il n'a pas comprises. Une explication est mal comprise ou incomprise si elle a été présentée plusieurs fois dans un même exercice. En effet, cela veut dire que la présentation de l'explication n'a pas suffi à résoudre le problème. Aussi, en fin de session d'apprentissage, et pour chaque explication incomprise, l'agent explicatif demande à l'apprenant de bien vouloir construire son graphe conceptuel.

5.6.6 Outil fourni à l'apprenant

Nous avons implanté un outil permettant à l'apprenant de construire son graphe de manière totalement graphique, par de simples mouvements de souris (drag-drop) (Figure 20), à partir des listes de concepts et de liens fournies par le concepteur.

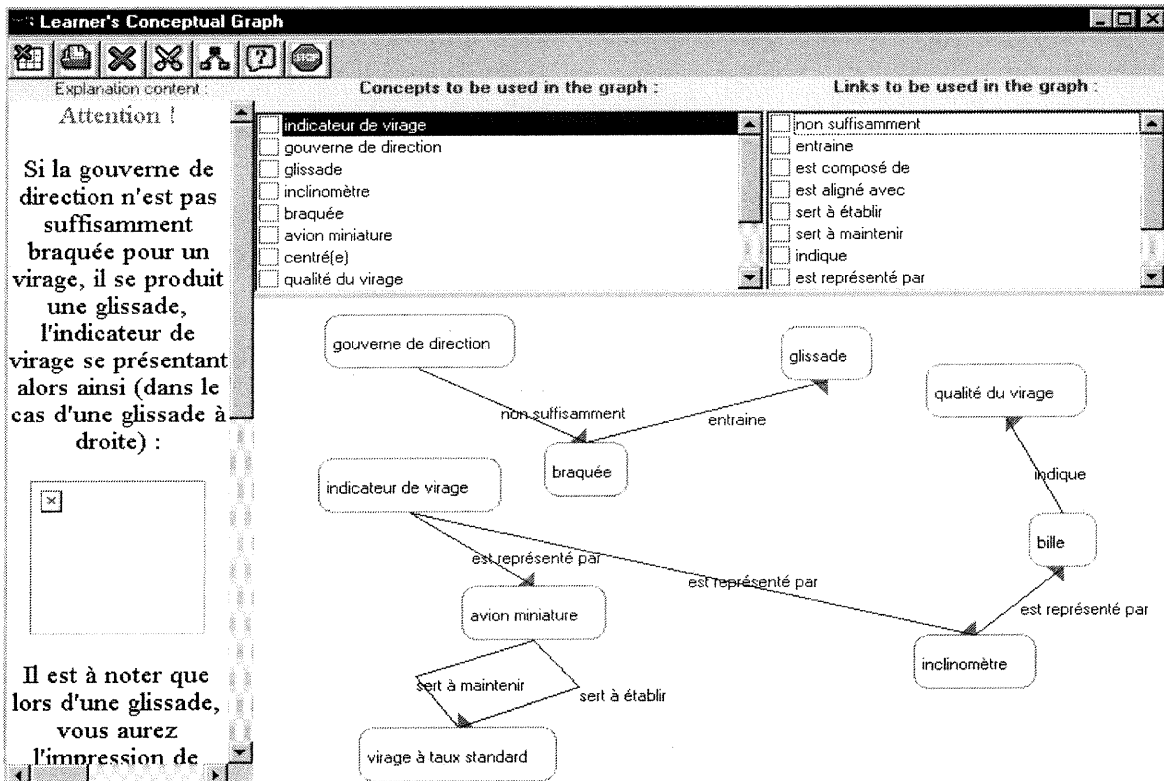


Figure 20 : Éditeur de graphes conceptuels (pour l'apprenant)

Ces listes sont fournies pour donner une idée à l'apprenant sur ce qu'il est censé faire, et parce qu'il serait extrêmement ardu d'analyser des connaissances ne figurant pas déjà dans le système.

Nous avons également développé un outil permettant de lancer les différents processus de la couche d'apprentissage de l'agent, ainsi que nous le montrons dans les points suivants.

5.7 Détermination de la qualité des explications présentées

Lorsque des quantités suffisantes de données sont disponibles, l'agent explicatif peut calculer l'index de qualité d'explications et déterminer ainsi globalement les « bonnes » et « mauvaises » explications (Figure 21, Figure 22).

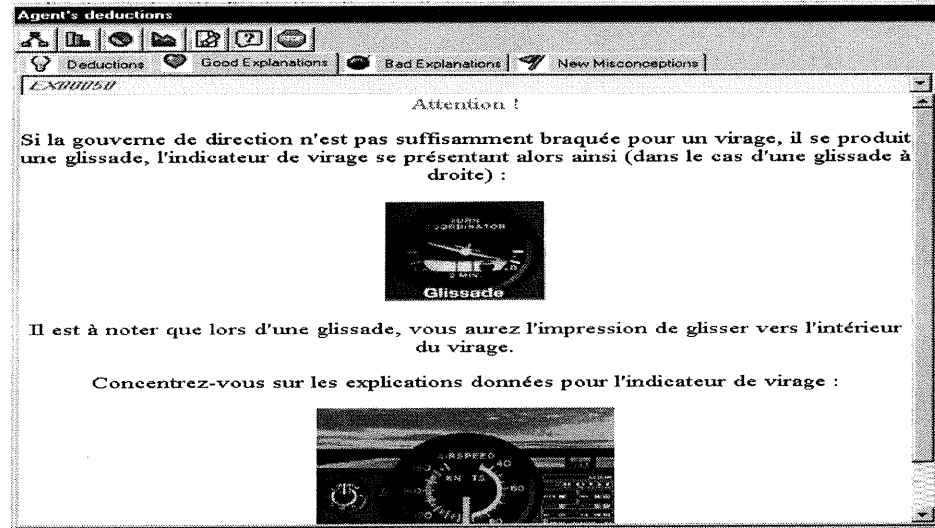


Figure 21 : Présentation des bonnes explications au concepteur

La figure 21 représente l'action de présenter les bonnes explications à leur concepteur. Par bonnes explications, nous entendons les explications ayant un fort index de qualité.

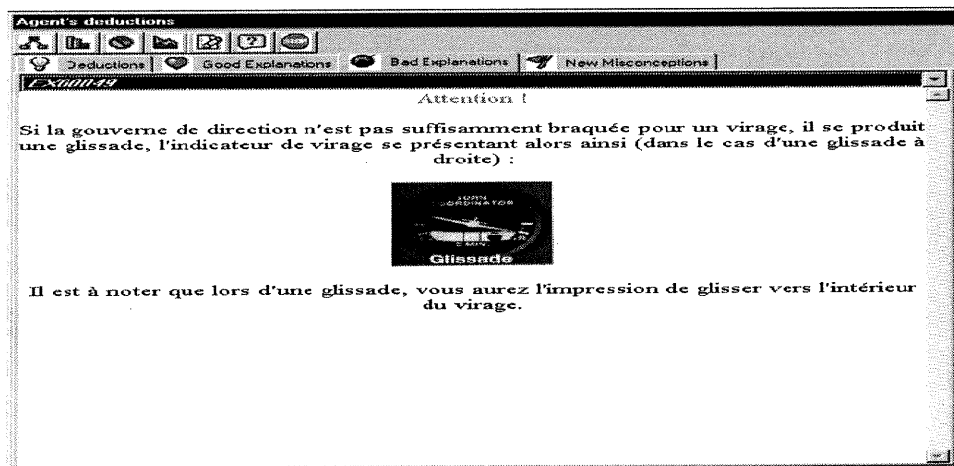


Figure 22 : Présentation des mauvaises explications au concepteur

Par opposition à la figure 21, la figure 22 représente l'action de présenter les mauvaises explications à leur concepteur. Par mauvaises explications, nous entendons les explications ayant un faible index de qualité.

5.8 Détermination des erreurs-types

L'agent explicatif peut également rechercher les erreurs types, commises lors du processus de résolution d'exercices, et conseiller alors au concepteur d'élaborer des explications pour pallier à ces problèmes (Figure 23).

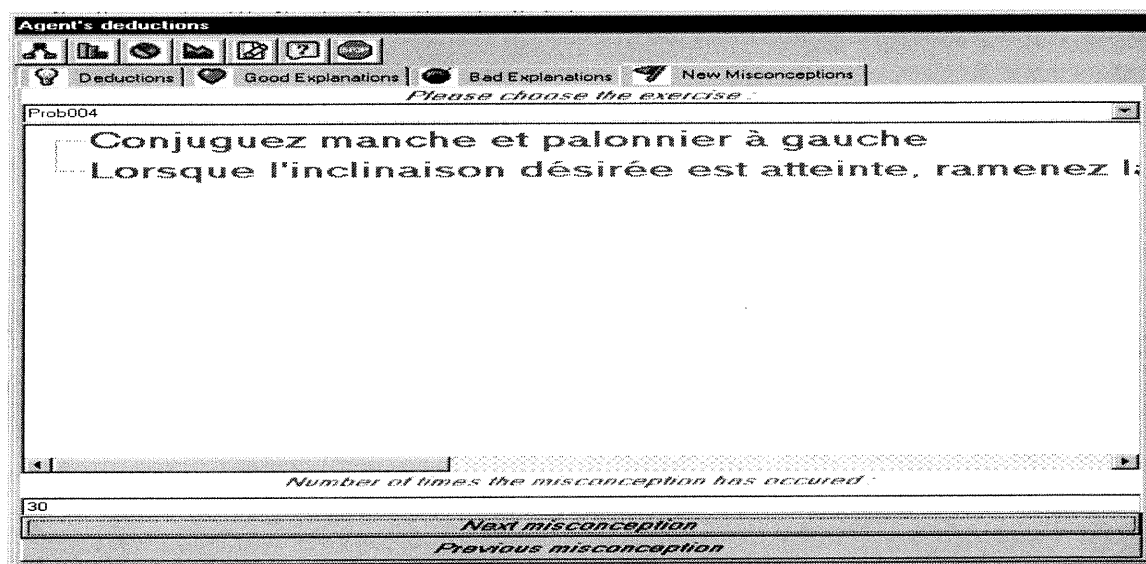


Figure 23 : Présentation de nouvelles erreurs types au concepteur (dans les problèmes à étapes)

En ce qui concerne la figure 23, nous avons préalablement dit que nous utilisons une librairie d'erreurs (bugs library) dans notre modèle de l'apprenant. La figure 23 présente la détection de nouvelles erreurs-types dans les problèmes à étapes. Dans ce type d'exercices, l'apprenant doit ordonner un ensemble d'étapes. Si une majorité d'apprenants indique une même séquence erronée comme réponse à l'exercice, l'agent explicatif se charge d'en aviser le concepteur du cours, par le biais de l'outil présenté figure 23. Ainsi, par exemple, dans cette figure, l'agent présente au concepteur une séquence d'actions erronée qui a été répétée 30 fois. C'est ensuite au concepteur de décider si c'est effectivement une erreur importante à ajouter à la librairie des erreurs.

5.9 Détection des points d'incompréhension dans une explication

5.9.1 Principe de l'algorithme d'apprentissage

Nous avons développé un algorithme d'apprentissage personnalisé qui compare (mécanisme d'appariement), pour une explication, les différents graphes conceptuels des apprenants et celui du concepteur. Cet algorithme détermine trois types d'erreurs :

- les concepts manquants;
- les liens manquants;
- les liens erronés;

Le mécanisme d'appariement des graphes conceptuels est indiqué ci-dessous.

Dans les trois cas de figure, il détermine avec quelle fréquence ces erreurs se produisent.

5.9.2 Appariement des graphes conceptuels

Ce que nous tentons de détecter lorsque nous comparons des graphes conceptuels, c'est leur dissemblance. En effet, un apprenant ne construit le graphe conceptuel d'une explication que si à priori, il ne l'a pas comprise. On peut donc raisonnablement supposer que son graphe conceptuel et celui du concepteur seront dissemblables. La détermination de ces erreurs et de leur fréquence est effectuée au moyen de l'appariement du graphe conceptuel du concepteur et des graphes conceptuels des apprenants. Cette opération (l'appariement de graphes conceptuels) est souvent une opération délicate, mais dans notre cas, elle ne se révèle pas trop ardue pour deux raisons principales :

- les concepts sont toujours représentés par des types ;
- les relations sont, dans notre cas, toujours binaires ;

Pour une explication :

- soit GC le graphe conceptuel du concepteur ;
- soit GCA l'ensemble des graphes conceptuels des apprenants ;

L'algorithme d'apprentissage commence par déterminer les différents concepts figurant aussi bien dans GC que dans chaque élément de GCA. Il divise ensuite chaque GC et chaque élément de GCA en un ensemble de triplets « concept-relation-concept ».

L'appariement des graphes conceptuels se fait par comparaison:

- des concepts figurant dans GC avec ceux figurant dans chaque élément de GCA. Des statistiques sont alors effectuées pour connaître le pourcentage d'oubli de chaque concept par l'ensemble des apprenants. C'est ainsi que l'on aboutit aux concepts manquants ;
- des triplets « concept-relation-concept » (représentant les liens sémantiques) figurant dans GC avec ceux figurant dans chaque élément de GCA. Des statistiques sont alors également effectuées pour connaître :
 1. le pourcentage d'oubli de chaque triplet « concept-relation-concept » par l'ensemble des apprenants. C'est ainsi que l'on aboutit aux liens manquants ;
 2. le nombre d'occurrences des triplets « concept-relation-concept » erronés, c'est-à-dire les liens ne figurant pas dans GC.

5.9.3 Affichage des résultats de l'algorithme d'apprentissage

Les résultats de l'analyse de l'agent sont présentés également sous forme d'un graphe conceptuel, avec des couleurs différentes pour indiquer les concepts et liens manquants, ainsi que les liens erronés (Figure 24). Ces erreurs sont ainsi clairement indiquées, et font ressortir les différences qui existent avec le graphe conceptuel du concepteur.

Plusieurs options sont disponibles comme de n'afficher que les liens erronés (Figure 25), ou que les liens inexistantes (Figure 26) si l'on éprouve des difficultés à lire le graphe conceptuel dans son ensemble. L'algorithme d'apprentissage reçoit donc en entrée des graphes conceptuels, et produit un graphe conceptuel en résultat.

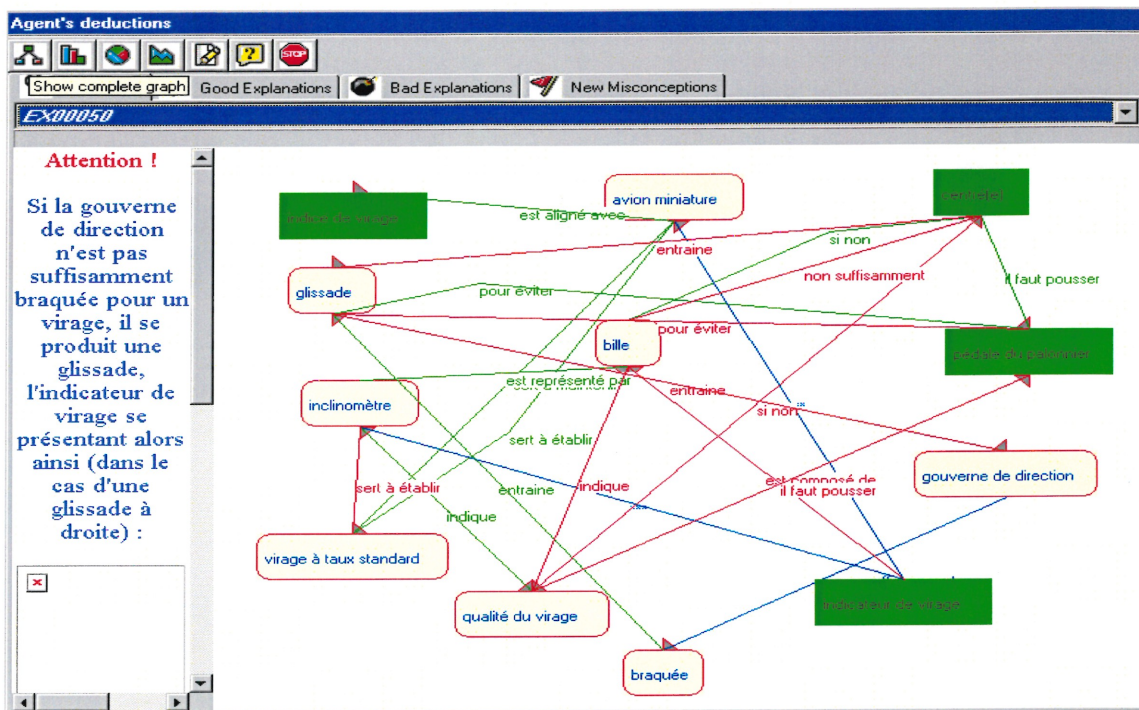


Figure 24 : Présentation des déductions de l'agent sous forme de graphes conceptuels (Graphe complet)

Cette figure (Figure 24) représente le graphe conceptuel résultant de l'algorithme d'apprentissage dans sa globalité. Les concepts manquants y figurent en vert, les liens manquants en vert également, et les liens erronés en rouge. Les liens en bleu sont des liens figurant dans le graphe conceptuel du concepteur, et que les apprenants ont correctement mentionnés.

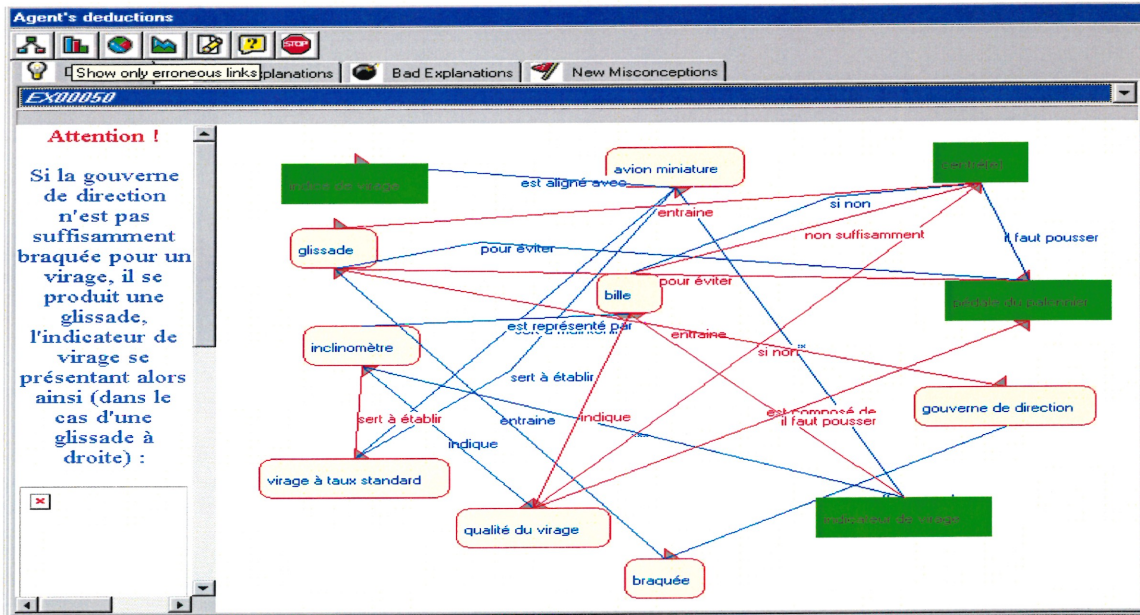


Figure 25 : Présentation des déductions de l'agent sous forme de graphes conceptuels (Liens erronés)

La figure 25 ne représente que les liens erronés, en rouge, ainsi que les liens corrects en bleu. Les concepts manquants y sont également représentés (en vert).

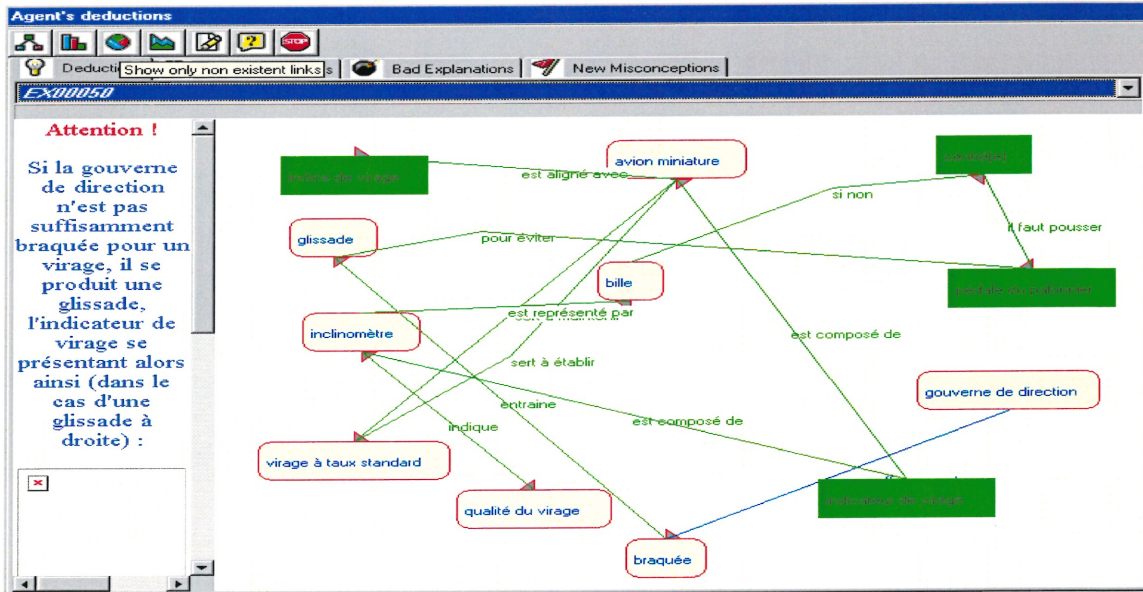


Figure 26 : Présentation des déductions de l'agent sous forme de graphes conceptuels (liens manquants)

La figure 26 représente les liens manquants et les concepts manquants en vert.

Nous pouvons donc récapituler les différentes options possibles :

- « Show Complete Graph », qui retrace toutes les différences et similitudes possibles ;
- « Show only erroneous links », qui donne une vue des liens erronés ;
- « Show only non existent links », qui donne une vue des liens manquants ;
- « Show main graph », qui donne une vue des erreurs les plus fréquemment commises (liens erronés, liens manquants, concepts manquants) ;

Cette dernière option permet d'avoir une vue sur les problèmes les plus graves, en terme de concepts manquants, de liens manquants et de liens erronés pour la majorité des apprenants.

Cet algorithme fait donc ressortir, pour une explication, les similitudes et les différences entre le graphe conceptuel du concepteur et les graphes conceptuels des apprenants. Des statistiques sont aussi disponibles pour indiquer le nombre de fois où une erreur a été commise. Il suffit simplement de cliquer sur le bouton droit de la souris pour les afficher (Figure 27). Ces différentes options ont été implantées afin de faciliter la lecture du graphe conceptuel résultant de l'analyse.

5.9.4 Présentation de conseils au concepteur

Suite aux résultats de l'algorithme, l'agent explicatif peut présenter un ensemble de conseils au concepteur (Figure 28):

- dans le premier cas, l'agent peut essayer de savoir si les concepts figurant dans l'explication ont été définis dans le cours. Si ce n'est pas le cas, l'agent peut conseiller au concepteur d'y remédier (définition dans le cours), ou d'utiliser d'autres concepts dans l'explication, ou de relier les concepts non connus de l'explication à d'autres concepts déjà rencontrés, ou encore de définir une explication relative à ces concepts inconnus de l'apprenant au niveau des exercices mêmes.
- si tous les concepts figurant dans l'explication sont normalement connus des apprenants, le problème se situe au niveau des liens entre connaissances. Il faut alors que le concepteur élabore des explications en soulignant les liens entre tels et tels

concepts et en démontrant les raisons de l'existence ou de l'inexistence de tels ou tels liens.

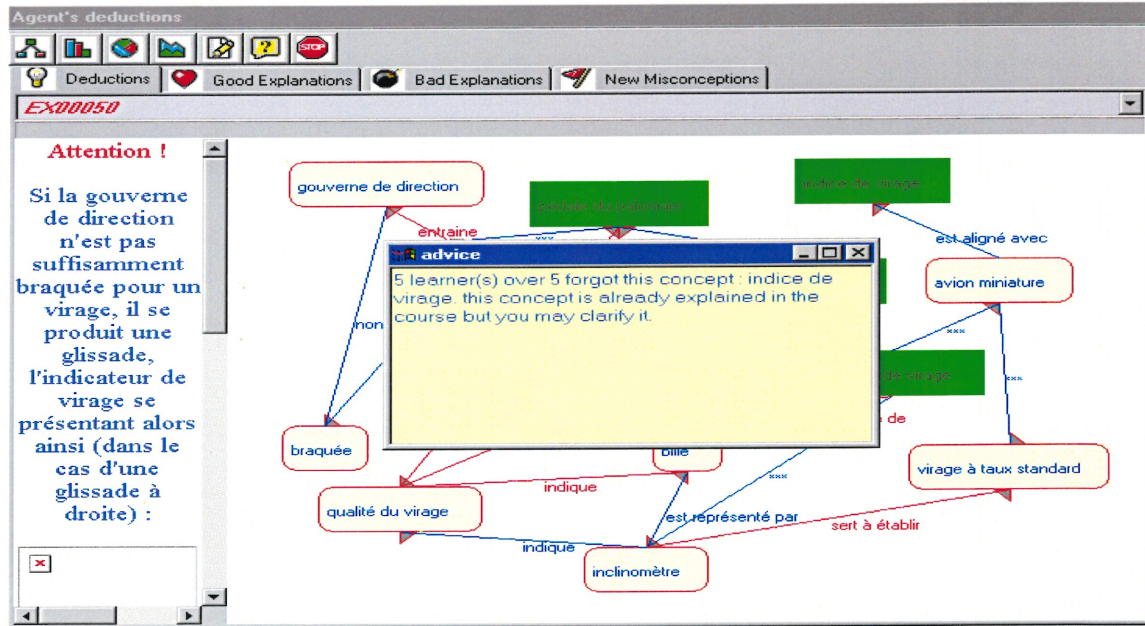


Figure 27 : Présentation d'une statistique liée à un concept donné

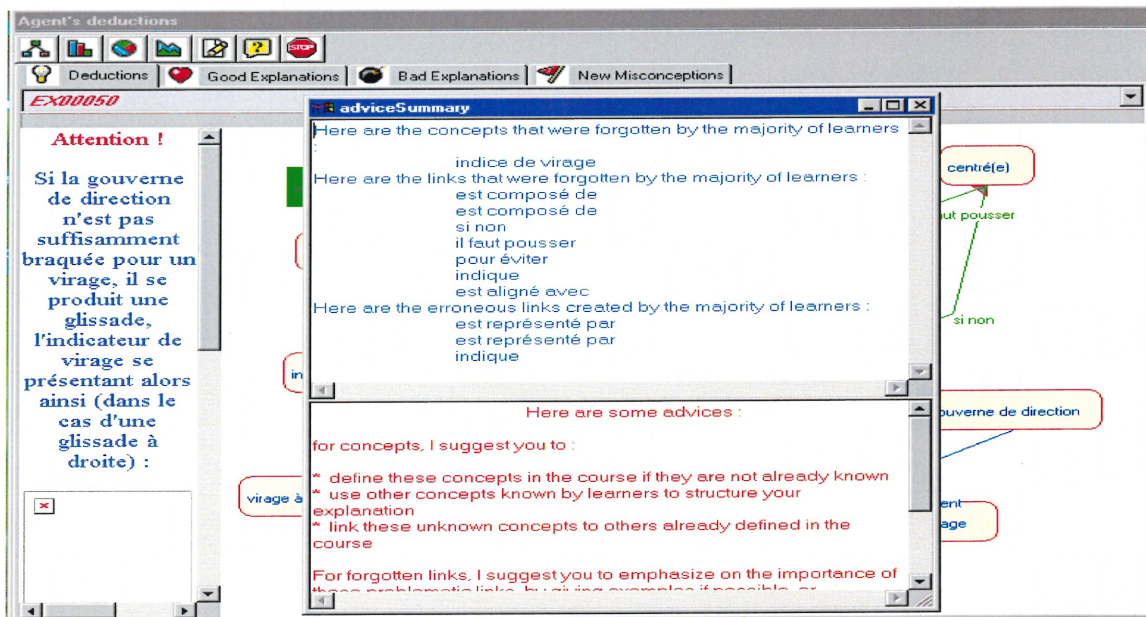


Figure 28 : Présentation du résumé des conseils liés au graphe conceptuel

Ainsi, le bouton « Advice summary » permet de résumer sous forme textuelle le graphe conceptuel résultant, en indiquant au concepteur les concepts et les liens oubliés le plus

fréquemment, ainsi que les liens erronés fréquents également. Puis un ensemble de conseils sont présentés au concepteur par l'agent quant à ce qu'il convient de faire pour remédier à ces problèmes.

Nous allons maintenant présenter les résultats de l'expérimentation que nous avons effectuée sur notre projet.

CHAPITRE 6 Expérimentation et directions futures

Nous avons réalisé une petite expérimentation sur les outils développés dans le cadre du projet « Enseignement à distance ». Actuellement, ces outils sont utilisés dans l'entreprise Virtuel-Âge International Inc.

6.1 Expérimentation de l'édition de cours

En ce qui concerne l'édition de cours, et de façon générale, 5 concepteurs de cours ont utilisé le logiciel développé.

Les remarques suivantes ont été formulées par ces concepteurs en réponse à notre questionnaire fourni en annexe A. Ces remarques sont regroupées selon les points suivants :

6.1.1 Convivialité de l'interface

L'interface a été jugée comme étant conviviale et facile à utiliser. Un concepteur ayant une formation informatique nous a toutefois fait quelques remarques plus pointues, concernant par exemple la barre d'outils (qui devrait être complétée selon lui), et certaines couleurs qui devraient être changées.

6.1.2 Rapidité de création et de mise à jour des cours

- Les concepteurs ont trouvé que les cours se créaient très rapidement. Plus particulièrement, l'éditeur d'explications a été apprécié pour la facilité et la rapidité avec laquelle des explications pouvaient être créées. Le fait de pouvoir créer une explication sous forme de page Web, et donc de pouvoir y intégrer des sons, images

et vidéos a été également apprécié. Nous avons par ailleurs, indiqué que le concepteur doit associer à chaque explication une cause d'erreur (les explications étant présentées lors de problèmes dans la résolution d'exercices). Cela peut nécessiter une réflexion assez intense de la part du concepteur d'après nos constatations.

- Les mises à jour de cours et d'exercices se font aussi facilement que leur création.

6.1.3 Utilité des différents types d'exercices

- Les différents types d'exercices ont été accueillis avec enthousiasme. Plus particulièrement, les problèmes à étapes ont été jugés adaptés à de nombreuses situations. Le fait de pouvoir utiliser le symbole * pour indiquer n'importe quelle étape a été apprécié. Ainsi, par exemple, si pour un concepteur, une séquence d'étapes erronée est constituée par les étapes 4 et 6, peu importe quelles étapes existent avant ou après cette séquence, le concepteur peut schématiser cela sous la forme « * 4 6 * ».
- La description détaillée de l'action a également été jugée pertinente. En effet, parfois, le texte ne suffit pas à lui seul à retracer ce que veut exprimer le concepteur. Pouvoir disposer d'une page Web pour cette description supplémentaire peut se révéler être un sérieux atout.

6.1.4 Compréhension et utilité des graphes conceptuels

- Généralement, en ce qui concerne la notion de graphe conceptuel, une fois le concept expliqué, les concepteurs n'avaient pas trop de mal à schématiser leurs explications sous forme de graphe conceptuel. Il faut toutefois suffisamment de contenu dans une explication pour pouvoir créer un graphe conceptuel, et pour que ce dernier soit utile. L'utilisation de graphes conceptuels est donc fonction du contenu des explications.
- Les concepteurs ont constaté que le fait d'avoir à tracer un graphe conceptuel pour une explication peut amener à se souvenir de concepts importants à y inclure, ou à supprimer une information superflue. Cela peut donc aider à fixer les idées des concepteurs.

6.1.5 Facilité d'utilisation du logiciel

- L'éditeur de concepts a été facile à utiliser, et la liste des concepts générés aisément modifiable quand elle ne correspondait pas à l'idée que s'en faisait le concepteur. Il nous faut toutefois souligner que lorsqu'une base de concepts dans le domaine existe, les concepts sont effectivement trouvés et ajoutés à la liste.
- Les liens prédéfinis, dans l'éditeur de liens, ont effectivement été utilisés. Il y a eu également réutilisation des liens créés par d'autres concepteurs. De nouveaux liens ont également été créés et sont venus enrichir la base de connaissances.

6.1.6 Utilité des déductions de l'agent explicatif

En ce qui concerne les déductions faites par l'agent sous forme de graphes conceptuels, les concepteurs ont apprécié les différentes options d'affichage, ainsi que les statistiques et le résumé des conseils, qui leur permettaient de faire le point globalement. Le fait de découvrir des erreurs non prévues initialement a également été utile de leur point de vue, puisque cela leur permettait de découvrir de nouvelles incompréhensions de l'apprenant et d'y remédier.

6.1.7 Suggestions

Les concepteurs ont, de façon générale, demandé de pouvoir disposer d'une aide, leur indiquant comment procéder pour la création de cours, d'exercices, d'explications et de graphes conceptuels. Ils nous ont également indiqué certaines de leurs préférences en ce qui concerne l'interface, comme le changement du libellé d'un bouton, etc.

6.2 Expérimentation du STI

Nous avons également tenté de tester le STI, bien que nous soyons conscients qu'une réelle évaluation doive se faire à l'échelle de centaines pour ne pas dire de milliers d'apprenants pour être valable, et pour que les forces et faiblesses du système apparaissent clairement (Ceci constitue d'ailleurs l'un des objectifs de Virtuel-Âge International Inc.). Nous avons toutefois développé un cours réduit en aéronautique avec

des exercices, et nous avons sollicité une dizaine d'apprenants sur un ensemble de points présentés dans le questionnaire de l'annexe B.

L'expérimentation concernant le STI a été effectuée avec des apprenants en majorité de formation informatique. En ce qui concerne la présentation du cours aux apprenants, les remarques suivantes ont été formulées :

6.2.1 Convivialité de l'interface et facilité d'utilisation

Les avis sur la convivialité et la facilité d'utilisation de l'interface étaient très diversifiés, allant d'une approbation totale à une demande de changement de l'interface. Certaines remarques étaient également très pointues comme par exemple, des remarques sur la taille des boutons, sur des options d'affichage, sur des manières de sélectionner l'information à utiliser, etc.

Les apprenants qui n'étaient pas de formation informatique ont par contre apprécié l'interface.

6.2.2 Utilité des explications

- De façon générale, la mécanique des conseils présentés par l'agent lorsqu'un apprenant commet une erreur a été appréciée. La pertinence des explications présentées dépend quant à elle du choix du concepteur et du contenu qu'il a mis dans les explications. C'est également le cas pour l'adaptation des explications au niveau de l'apprenant. Si toutefois, ces dernières ne sont pas adaptées, le système peut le détecter et informer le concepteur des incompréhensions liées à son explication afin qu'il y remédie.
- La présentation des causes d'erreur possibles a tout d'abord dérouté la majorité des apprenants. Toutefois, il existe l'option « no opinion » qui leur permet d'accéder à l'explication reliée à la cause d'erreur la plus probable. Enfin, il convient de souligner que cette perturbation s'est peu à peu dissipée au fur et à mesure de l'utilisation du système.

6.2.3 Pertinence de la personnification de l'agent

- De façon générale, les apprenants ont grandement apprécié le caractère autonome de l'agent, c'est-à-dire son apparition spontanée lorsqu'une erreur était détectée.
- La personnification de l'agent a plutôt laissé les apprenants indifférents. Deux apprenants ont été amusés par ses expressions, et deux autres ont été dérangés par ses mimiques. Il peut être intéressant de noter que les apprenants n'ayant pas de formation informatique étaient plutôt amusés par les expressions de l'agent. Nous ne pouvons toutefois pas tirer de conclusions en raison de leur nombre plus que réduit (2).
- Le fait que l'agent parle a été jugé intéressant, parce qu'apportant plus d'interactivité. Toutefois, à la longue, cela a été jugé quelque peu énervant.

6.2.4 Facilité d'utilisation des graphes conceptuels

- La proportion des apprenants ayant trouvé la création de graphes conceptuels accessible était plus élevée que celle des apprenants l'ayant trouvée difficile. Toutefois, nous avons remarqué que dans les deux cas, la facilité de création d'un graphe conceptuel augmentait au fur et à mesure de son utilisation.
- Globalement, les apprenants sont contents de disposer de listes de concepts et de liens mises à leur disposition par le concepteur. Ils jugent qu'il serait plus ardu de tracer un graphe conceptuel s'ils avaient en plus à donner leur propre vocabulaire.
- De manière générale, les apprenants ont jugé que dans tous les cas, la création de graphes conceptuels ne pouvait pas perturber leur compréhension de l'explication, mais plutôt favoriser leur rétention.

6.2.5 Suggestions

- Tous les apprenants se sont entendus sur le fait qu'une aide pour la création de graphes conceptuels serait nécessaire, avec des explications sur la notion de graphes conceptuels, de concepts et de liens sémantiques, ainsi que des graphes exemples.

- Dessiner des graphes conceptuels en fin de session peut sembler lourd. Effectivement, la perspective de pouvoir le faire sous forme d'exercices, juste après la détection de l'incompréhension, a été approuvée.

Ce sont donc, de manière générale, les appréciations données aussi bien par les concepteurs que les apprenants. Nous allons maintenant, en nous basant sur ces appréciations, déterminer quelles pourraient être les directions futures de notre projet.

6.3 Directions futures

Suite aux différentes opinions que nous avons collectées aussi bien auprès des concepteurs que des apprenants, nous avons pu dégager un ensemble d'améliorations à apporter au projet :

6.3.1 Apport d'une aide

L'apport d'une aide est indispensable aussi bien du côté concepteur que du côté apprenant. Plus particulièrement, il faudrait que le principe des graphes conceptuels soit présenté aux apprenants, avec un ou plusieurs graphes exemples afin de « démystifier » l'approche.

6.3.2 Amélioration de l'interface

- Certaines améliorations devraient être apportées à l'interface de l'éditeur de cours.
- Il faudrait remanier l'interface du STI de manière à tenir compte des différentes remarques des apprenants.

6.3.3 Personnification de l'agent en trois dimension

- La personnification de l'agent explicatif sous forme de personnage en trois dimensions pourrait être un créneau intéressant, elle pourrait permettre d'ajouter à la crédibilité de l'agent.
- Il serait important d'avoir une option pour rendre l'agent muet pour ceux qui le souhaitent.

6.3.4 Création d'une typologie des explications

Il serait intéressant de créer une certaine typologie des explications (explications par exemple, explications socratiques, explications par niveaux de détails différents), et d'associer un type à un niveau d'apprenant donné, en se basant en cela sur l'expérience des concepteurs. L'expérience pourrait révéler si les hypothèses de départ sont justes, ou encore révéler d'autres tendances, comme par exemple, que des explications plus détaillées sont nécessaires aux débutants.

6.3.5 Création de graphes conceptuels sous forme d'exercices

Ainsi que nous l'avons dit, la création de graphes conceptuels sous forme d'exercices plutôt qu'en fin de session, est la prochaine étape à réaliser. De ce fait, le test de l'incompréhension est quasiment transparent pour l'apprenant, alors que lorsque nous lui demandons de tracer des graphes conceptuels en fin de session, il a tendance à se demander les raisons de cette tâche supplémentaire et à « renâcler » face à ce travail inattendu.

6.3.6 Sollicitation de l'agent

Il pourrait également être opportun que l'apprenant puisse délibérément solliciter l'agent durant une session d'apprentissage, et plus précisément en cours de résolution d'exercices plutôt que d'avoir uniquement à attendre que ce dernier apparaisse pour lui signifier la détection d'une erreur.

6.3.7 Traitement des relations n-adiques dans les graphes conceptuels

Dans les graphes conceptuels, et au stade actuel du projet, seules les relations binaires, de concept à concept sont permises. Or nous avons remarqué qu'il arrivait que ce soit un sous-graphe du graphe conceptuel qui induise une relation avec un concept. Permettre cette modélisation serait certainement une amélioration.

6.3.8 Recherche dynamique d'explications équivalentes

Dans le système, les explications à présenter à l'apprenant sont déterminées à l'avance par le concepteur. Il pourrait être intéressant de rechercher dynamiquement des explications équivalentes en se basant sur des méthodes de recherche d'informations, sachant que nous disposons d'une base de connaissances d'explications. Cela permettrait d'introduire un aspect dynamique dans la présentation d'explications et constituerait un travail intéressant d'extraction de connaissances.

6.3.9 Amélioration de l'extraction de concepts

L'extraction de concepts est ce que l'on peut appeler une extraction primaire. En effet, seul le mot clé exact est reconnu, ses dérivés ne le sont pas. Il pourrait être intéressant d'améliorer cette extraction de manière à ce que les dérivés des concepts soient reconnus.

Nous allons maintenant présenter les conclusions auxquelles nous sommes parvenus suite à ces résultats.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

Les STI visent à dispenser un enseignement individualisé. Deux technologies ont influencé leur domaine de recherche durant les dernières années : l'essor d'Internet et son importance grandissante en tant que support à l'enseignement à distance, et la technologie des agents intelligents. Nous avons tenté d'utiliser les potentialités de ces deux technologies dans notre projet «Enseignement à distance». Il en a résulté deux classes d'outils :

- des outils d'édition permettant de créer le contenu d'un cours (avec ses exercices, ses explications, etc.) ;
- des outils de présentation sous forme de STI visant à dispenser cet enseignement.

Différents agents (l'agent planificateur, l'agent explicatif, l'agent modèle de l'apprenant) ont été créés par l'équipe de Virtuel-Âge International Inc. pour aider l'apprenant dans le cadre de son apprentissage. Plus particulièrement, et c'est ce qui a été présenté dans ce mémoire, nous avons implanté un agent explicatif permettant de présenter des explications aux apprenants lors d'une session d'enseignement. C'est dans ce terme : «explication» que réside le concept clé de la présente recherche. En effet, à travers la littérature et l'état de l'art que nous avons effectué, une constatation a pu être dégagée : si les travaux sur la génération des explications sont nombreux (particulièrement dans le domaine des systèmes experts) ainsi que les travaux sur les différentes stratégies pédagogiques permettant de présenter ces explications de la manière la plus optimale possible, en revanche, très peu de recherches sont orientées vers l'évaluation de

l'efficacité et de la qualité des explications présentées. Il semblerait que lorsque l'on injecte ou génère une explication dans un système (d'enseignement ou autre), l'on tienne pour acquis que cette explication va remplir son rôle, et être efficace. Nous sommes plus que sceptiques sur le bien fondé d'une telle assertion (encore que cette assertion provienne de notre observation de l'état des recherches dans le domaine et non d'une idée clairement formulée par la communauté informatique). C'est pourquoi, notre souci premier a été de réaliser un système permettant d'évaluer la qualité de sa base de connaissances d'explications.

Pour ce faire, nous avons implanté un agent intelligent dont les fonctions sont multiples :

- présentation d'explications adaptées au profil de l'apprenant ;
- détection de nouveaux « patrons » d'erreurs et donc extension de la librairie des erreurs et enrichissement du système de connaissances puisque de nouvelles explications viennent se greffer à ces erreurs types ;
- évaluation de la qualité des explications via un index de qualité ;
- détection des incompréhensions de l'apprenant via la théorie des graphes conceptuels, et présentation au concepteur de conseils visant à remédier à ces problèmes.

De plus, nous avons tenu à ce que l'enseignant humain continue à jouer un rôle primordial dans les STI, en ce sens que ce concepteur doit tout d'abord créer tout le contenu du cours, mais aussi se charger du suivi des connaissances que le système utilise, en se basant en cela sur les recommandations de l'agent explicatif.

Ces recommandations proviennent d'une analyse des explications, analyse fondée sur la structuration de ces dernières en graphes conceptuels. Les raisons d'une telle orientation trouvent sans nul doute leurs origines dans notre perception du raisonnement humain (tel que nous le décrivent les chercheurs en psychologie cognitive) : l'être humain tend à intégrer les nouvelles connaissances dans sa mémoire en les liant à un savoir antérieur. Sa bonne compréhension dépend donc de la justesse de ces liens sémantiques.

L'hypothèse selon laquelle les raisons de l'incompréhension d'une explication ou d'un contenu en général résultent donc d'un manque d'intégration des connaissances ou de la création de liens erronés entre ces dernières est celle sur laquelle nous nous sommes basés. D'où l'idée de structurer les explications dans notre système sous forme de concepts et liens, et de demander à l'apprenant d'essayer de retracer la sémantique de l'explication par ce biais. Nous sommes donc partis de l'hypothèse que nous pouvons déterminer ainsi les points précis d'incompréhension ou de manque de connaissances.

Un second objectif est lié à notre approche : nous pensons que le fait d'avoir à raisonner sur la sémantique d'une explication et d'avoir à la schématiser ne peut que favoriser la rétention de l'apprenant et l'aider à découvrir ses propres incompréhensions. Par ailleurs, cette approche nous permet de faire évoluer les connaissances du système, et de fournir une rétroaction constante au concepteur du cours. Ce dernier point est important puisque selon nous, rien ne saurait égaler les explications humaines, particulièrement dans le domaine de l'enseignement. Il nous faut donc créer des systèmes qui, s'ils sont automatisés, n'en continuent pas moins de se baser sur l'intelligence et le savoir humains.

Nous avons effectué quelques expériences, ainsi que décrit dans le chapitre précédent, aussi bien au niveau des outils d'édition que des outils de présentation. De grandes lignes peuvent être récapitulées à ce niveau :

- en ce qui concerne les graphes conceptuels, et au niveau des apprenants, nous avons remarqué que certains de ces derniers avaient le plus grand mal à effectuer une création de graphes conceptuels, alors que d'autres l'accomplissaient avec une facilité déconcertante. C'est la philosophie même des graphes conceptuels qui semblait poser problème dans certains cas. Pourrait-on dès lors s'interroger sur l'existence de deux grandes catégories d'apprenants, l'une apte à créer des graphes conceptuels et l'autre ayant de la difficulté à le faire ? et si c'est le cas, ne serait-il pas intéressant de déterminer les différences entre ces catégories ?
- la caractéristique de crédibilité de l'agent et ce qui en découle en terme de personnification, de langage naturel pour l'agent, etc., ne semble pas être jugée de la

même façon par différentes catégories de personnes. Comme nous l'avons fait remarquer, des apprenants de formation informatique par exemple la jugent généralement inutile. N'oublions pas malgré tout que les STI ne ciblent pas forcément ni uniquement ces derniers. Il convient toutefois, à notre avis, d'utiliser des personnages plus crédibles et surtout d'implanter des options permettant d'activer ou non ces caractéristiques d'interactivité ;

- une aide aussi bien côté concepteur qu'apprenant va être développée afin d'introduire les environnements dans lesquels ces derniers travaillent, les activités auxquelles ils auront à prendre part, ainsi que les potentialités des systèmes qu'ils ont entre les mains ;
- des améliorations concernant l'interface, le passage de concepts simples (dans les graphes conceptuels) à des concepts composés (sous forme de graphes conceptuels), la typologie des explications, les stratégies de présentation des explications, et la recherche dynamique de ces dernières constituent également des directions futures au projet ;
- enfin, du côté concepteur, l'on peut se poser les questions suivantes : est-il si facile que cela de créer des graphes conceptuels ? les outils d'édition de cours ne doivent-ils pas se centrer sur la rapidité de création de ces derniers, auquel cas les graphes conceptuels constituent une tâche supplémentaire et astreignante pour le concepteur ? Mais ceci soulève une autre question importante : peut-on espérer produire des systèmes informatiques performants et effectuant des raisonnements si on ne leur injecte pas la connaissance nécessaire ?

Nous pensons qu'un compromis doit être fait entre la rapidité de création et le degré d'efficacité et de perfectionnement du système auquel nous voulons parvenir. Les graphes conceptuels, en l'occurrence, font-ils partie de ce compromis ?

BIBLIOGRAPHIE

Abou-Jaoude, S., Frasson, C., Charra, O., Troncy, R. (1999). On the Application of a Believable Layer in ITS. Proceedings of Workshop on Synthetic Agents, Ninth International Conference on Artificial Intelligence in Education , AIED'99, July, Le Mans, France.

Anderson , J.R. (1988). The Expert Module. Foundations of Intelligent Tutoring Systems. Polson M.C., Richardson J.J.(eds), Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New Jersey, pp. 21-53.

Anderson, J.R., Boyle, C.F., Corbett, A., Lewis, M. (1986). Cognitive Modeling and Intelligent Tutoring. CMU Technical Report, Pittsburg, PA, Carnegie-Mellon University, Psychology department.

Anderson, J.R., Boyle, C.F., Yost, G. (1985). The Geometry Tutor. Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Los Altos, CA. Joshi A. (ed.), Morgan Kaufmann, pp.1-7.

Anderson, J.R., Reiser, B.J. (1985). The Lisp Tutor. Byte, vol.10, pp.159-175.

André, E., Rist, T., Müller, J. (1997). WebPersona : A Life-like Presentation Agent for Educational Applications on the World Wide Web. Internet URL : http://www.contrib.andrew.cmu.edu/~plb/AIED97_workshop/Andre/Andre.html

Bélanger, S., Desjardins, D., Frasson, C., Aïmeur, E. (1999). Exploration des Techniques d'Explication Automatique pour les Systèmes d'Aide à la Décision. Recherche et développement pour la défense, Mars.

Brusilovsky, P., Eklund, J., Schwarz, E. (1997). Adaptive Navigation Support in Educational Hypermedia on the World Wide Web. Human-Computer Interaction. Proceedings of INTERACT97, The Sixth IFIP World Conference on Human-Computer Interaction, Sydney, Australia, July 14-18. Howard S., Hammond J., Lindgaard G. (eds) New York, Chapman & Hall, pp. 278-285.

Brusilovsky, P., Schwarz, E. (1997). User as Student: Towards an Adaptive Interface for Advanced Web-Based Applications. Proceedings of Sixth International Conference on User Modeling, Chia Laguna, Sardinia, Italy, June 2-5. Jameson A., Paris C., Tasso C. (eds), Wien, Springer-Verlag, pp. 177-188.

Brusilovsky, P., Ritter, S., Schwarz, E. (1997). Distributed Intelligent Tutoring on the Web. Artificial Intelligence in Education, Knowledge and Media in Learning Systems. Proceedings of Eighth World Conference on Artificial Intelligence in Education, Kobe, Japan, August 18-22, AIED'97. Du Boulay B., Mizoguchi R. (eds). Amsterdam, IOS Press, pp. 482-489.

Brusilovsky, P., Schwarz, E., Weber, G. (1996). ELM-ART: An Intelligent Tutoring System on World Wide Web. Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Vol. no 1086, Proceedings of Third International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'96, Montreal, June 12-14. Frasson C., Gauthier G., Lesgold A. (eds), Berlin, Springer Verlag, pp. 261-269.

Brusilovsky, P. (1992). A Framework for Intelligent Knowledge Sequencing. *Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Vol. no 608, Proceedings of Second International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'92, Montreal, June 10-12.* Frasson C., Gauthier G., McCalla G.I (eds), Berlin, Springer-Verlag, pp. 499-506.

Buchanan, B.G., Shortliffe, E.H. (1984). *Rule Based Expert Systems : the MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project.* Addison Wesley.

Burns, H.L., Capps C.G. (1988). *Foundations of Intelligent Tutoring Systems: An Introduction.* Foundations of Intelligent Tutoring Systems, Polson M.C., Richardson J.J.(eds), Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New Jersey, pp. 1-19.

Burton, R.R. (1988). *The Environment Module of Intelligent Tutoring Systems.* Foundations of Intelligent Tutoring Systems, Polson M.C., Richardson J.J.(eds), Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New Jersey, pp. 109-142.

Burton, R.R., Brown, J.S. (1982). *An Investigation of Computer Coaching for Informal Learning Activities.* Intelligent Tutoring Systems, Sleeman D., Brown J.(eds), Orlando, FL, Academic Press.

Calvi, L., De Bra, P. (1997). *Using Dynamic Hypertext to Create Multi-Purpose Textbooks.* Proceedings of ED-MEDIA/ED-TELECOM'97, World Conference on Educational Multimedia/Hypermedia and World Conference on Educational Telecommunications. Müldner T., Reeves T.C. (eds), Calgary, Canada, June 14-19, AACE, pp. 130-135.

Cawsey, A.J. (1995). *Developing an Explanation Component for a Knowledge-Based System: Discussion.* Expert Systems with Applications, vol. 8, no. 4, pp 527-531.

Chan, T-W. (1996). Learning Companion Systems, Social Learning Systems, and the Global Social Learning Club. *Journal of Artificial Intelligence in Education*, vol. 7, no. 2, pp. 125-159.

Chan, T-W, Baskin, A.B. (1990). Learning Companion Systems. *Intelligent Tutoring Systems, At the Crossroads of Artificial Intelligence and Education*, Chapter 1. Frasson C., Gauthier G. (eds) , New Jersey, Ablex Publishing Corporation.

Chandrasekaran, B. (1986). Generic Tasks in Knowledge-Based Reasoning. *IEEE Expert*, vol. 1, no. 3, pp. 23-30.

Clancey, W.J. (1986). From GUIDON to NEOMYCIN and HERACLES in Twenty Short Lessons. ORN Final Report 1979-1985. *AI Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 40-60.

Clancey W.J. (1983). GUIDON. *Journal of Computer-Based Instruction*, vol. 10, no. 1, pp. 8-14.

David, J.M., Krivine, J-P, Simmons, R. (1993). *Second Generation Expert Systems*, Springer-Verlag.

Davis, R. (1976). Application of Meta Knowledge to the Construction, Maintenance and Use of Large Knowledge Bases. PhD thesis, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Memo283.

Dillenbourg, P. (1996). Some Technical Implications of Distributed Cognition on the Design on Interactive Learning Environments. In *Journal of Artificial Intelligence in Education*, vol.7, no. 2, pp.161-179.

Dufort, H. (1999). Évaluation et Adaptation de Cours dans un Système Tutoriel Intelligent. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal.

Eliot, C., Neiman, D., Lamar, M. (1997). Medtec: A Web-based Intelligent Tutor for Basic Anatomy. Proceedings of WebNet'97, World Conference of the WWW, Internet and Intranet. Lobodzinski S., Tomek I. (eds), Toronto, Canada, November 1-5, AACE, pp. 161-165.

Elliot, J.L. (1997). Coordinating Speech and Actions for Animated Pedagogical Agents. Internet URL : <http://www.csc.ncsu.edu/degrees/undergrad/Reports/jlelliot/thesis97.html>

Faulhaber, S., Reinhardt, B. (1997). D3-WWW-Trainer: Entwicklung einer Oberfläche für die Netzanwendung. In URL6.

Ferber, J. (1997). Les Systèmes Multi-Agents, Vers une Intelligence Collective. InterEditions, Paris, France.

Frasson, C., Martin, L., Gouardères, G., Aïmeur, E. (1998). LANCA : a Distance Learning Architecture Based on Networked Cognitive Agents. Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Vol. no 1452, Proceedings of Fourth International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'98, San Antonio, Texas, USA, August 16-19. Goettl B.P., Halff H.M., Redfield C.L., Shute V.J. (eds). pp. 594-603.

Frasson, C., Mengelle, T., Aïmeur, E. (1997). Using Pedagogical Agents in a Multi-Strategic Intelligent Tutoring System. Proceedings of Workshop V on Pedagogical Agents, Eighth International Conference on Artificial Intelligence in Education, AIED 97, Kobe, Japan, August 19.

Frasson, C., Mengelle, T., Aïmeur, E., Gouardères, G. (1996). An Actor-Based Architecture for Intelligent Tutoring Systems. Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Vol. no 1086, Proceedings of Third International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'96, Montreal, June 12-14. Frasson C., Gauthier G., Lesgold A. (eds), Berlin, Springer Verlag, pp. 57-65.

Goguen, J.A., Weiner, J.L., Linde, C. (1983). Reasoning and Natural Explanation. *International Journal of Man-Machine Studies*, vol.19.

Greeno, J.G., Collins, A., Beranek, B., Resnick, L.B. (1994). Cognition and Learning. *Handbook of educational psychology* . Berliner D., Calfee R. (eds), pp. 1-51.

Grice H.P. (1975). Logic and Conversation. *Syntax and Semantic III : Speech Acts*. Academic Press, New York, NY, pp. 41-58.

Halff, H.M. (1988). Curriculum and Instruction in Automated Tutors. *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*, Polson M.C., Richardson J.J.(eds.), Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New Jersey, pp.79-108.

Haton, J.P., Bouzid N., Charpillet, F., Haton, M.C., Laasri, B., Laasri, H., Marquis, P., Mondot, T., Napoli, A. (1991). *Le Raisonnement en Intelligence Artificielle*. InterEditions, Paris, France, p. 43.

Herrmann, J., Kloth, M., Feldkamp, F. (1998). The Role of Explanations in an Intelligent Assistant System. *Artificial Intelligence in Engineering*, Elsevier, vol. 12, pp. 107-126.

Holt, P., Dubs, S., Jones, M., Greer, J. (1991). The State of Student Modeling. *Student Modeling : the Key to Individualized Knowledge-Based Instruction*. Greer J.E., McCalla G.I. (eds), Vol. 125, NATO ASI series, pp. 3-35.

Hoppe, U. (1995). Use of Multiple Student Modeling to Parametrize Group Learning. *Proceedings of Seventh International Conference on Artificial Intelligence in Education, AIED'95*, Washington, DC, August 16-19. Greer J. (ed.), AACE, pp. 234-249.

Höök, K. (1995). Adaptation to the User's Task. Technical report R95-08, Swedish Institute of computer science. Internet URL :

<ftp://ftp.sics.se/pub/SICS-reports/Reports/SICS-R--95-08--SE.ps.Z>

Ikedo, M., Go, S., Mizoguchi, R. (1997). Opportunistic Group Formation. Artificial Intelligence in Education, Knowledge and Media in Learning Systems. Proceedings of Eighth World Conference on Artificial Intelligence in Education, Kobe, Japan, August 18-22, AIED'97. Du Boulay B., Mizoguchi R. (eds). Amsterdam, IOS Press, pp. 167-174.

Johnson, L.W. (1998). Pedagogical Agents. Invited Paper at the International Conference on Computers in Education, China, October.

Internet URL : <http://www.isi.edu/isd/VET/vet.html>

Johnson, L.W., Shaw, E., Ganeshan, R. (1998). Pedagogical Agents on the Web. Proceedings of Workshop on pedagogical agents, Fourth International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'98, San Antonio, Texas, USA, August 16-19.

Internet URL <http://www.isi.edu/isd/ADE/papers/its98/ITS98-WW.htm>

Kabbaj, A. (1996). Un Système Multi-Paradigme pour la Manipulation des Connaissances Utilisant la Théorie des Graphes Conceptuels. Thèse de doctorat, Département d'Informatique et de Recherche Opérationnelle, Université de Montréal.

Kay, J., Kummerfeld, R.J. (1994). An Individualised Course for the C Programming Language. Proceedings of Second International WWW Conference, Chicago, IL, October 17-20. Internet URL :

<http://www.ncsa.uiuc.edu/SDG/IT94/Proceedings/Educ/kummerfeld/kummerfeld.html>.

Khan, M., Paul, S.J., Brown, K.E., Leitch, R.R. (1998). Model-Based Explanations in Simulation-Based Training. Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Vol. no 1452, Proceedings of Fourth International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'98, San Antonio, Texas, USA, August 16-19. Goettl B.P., Half H.M., Redfield C.L., Shute V.J. (eds), pp.16-25.

Lester, J.C., Callaway, C.B., Towns, S.G. (1998). Creating Lifelike Behaviors in Animated Pedagogical Agents. Proceedings of Workshop on pedagogical agents, Fourth International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'98, San Antonio, Texas, USA, August 16-19.

Lester, J.C., Callaway, C.B., Stone, B.A., Towns, S.G. (1997). Mixed Initiative Problem Solving with Animated Pedagogical Agents. Proceedings of Workshop V on Pedagogical Agents, Eighth International Conference on Artificial Intelligence in Education , AIED'97, Kobe, Japan, August 19.

Linton, F., Charron, A., Joy, D. (1998). The OWL Pedagogical Agent. Proceedings of Workshop on pedagogical agents, Fourth International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'98, San Antonio, Texas, USA, August 16-19.

Luger, G.F., Stubblefield W.A. (1998). Artificial Intelligence Structure and Strategies for Complex Problem Solving, Addison Wesley Longman Inc.

McCalla, G.I., Greer, J.E. (1991). Granularity-Based Reasoning and Belief Revision in Student Models. The Key to Individualised Knowledge-Based Instruction. Greer J.E., McCalla G.I. (eds), Nato ASI Series.

McKeown, K.R. (1988). Generating Goal-Oriented Explanations. International Journal of Expert Systems, vol. 1, no. 4, pp. 377-395.

Metzler, D.P., Martincic, C.J. (1998). Explanatory Mechanisms for Intelligent Tutoring Systems. Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Vol. no 1452, Proceedings of Fourth International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'98, San Antonio, Texas, USA, August 16-19. Goettl B.P., Halff H.M., Redfield C.L., Shute V.J. (eds), pp.136-145.

Miller, J.R. (1988). The Role of Human-Computer Interaction in Intelligent Tutoring Systems. Foundations of Intelligent Tutoring Systems, Polson M.C., Richardson J.J.(eds), Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New Jersey, pp. 143-189.

Murray, T. (1999). Authoring Intelligent Tutoring Systems, An Analysis of the State of the Art. International Journal of AI and Education, Vol. 10, no. 1, pp. 98-129.

Nakabayashi, K., Maruyama, M., Kato, Y., Touhei, H., Fukuhara, Y. (1997). Architecture of an Intelligent Tutoring System on the WWW. Artificial Intelligence in Education, Knowledge and Media in Learning Systems. Proceedings of Eighth World Conference on Artificial Intelligence in Education, Kobe, Japan, August 18-22, AIED'97. Du Boulay B., Mizoguchi R. (eds). Amsterdam, IOS Press, pp. 39-46.

Okazaki, Y., Watanabe, K., Kondo, H. (1997). An Implementation of the WWW Based ITS for Guiding Differential Calculations. Proceedings of Workshop on Intelligent Educational Systems on the World Wide Web at AIED'97, Eighth World Conference on Artificial Intelligence in Education, Kobe, Japan, August 18, ISIR. Brusilovsky P., Nakabayashi K., Ritter S. (eds), pp. 18-25. Internet URL : http://www.contrib.andrew.cmu.edu/~plb/AIED97_workshop/Okazaki/Okazaki.html.

Okazaki, Y., Watanabe, K., Kondo, H. (1996). An Implementation of an Intelligent Tutoring System (ITS) on the World-Wide Web (WWW). Educational Technology Research vol. 19, no.1, pp. 35-44.

Paris, C.L. (1988). Tailoring Object Descriptions to the User's Level of Expertise. Computational Linguistics, vol. 14, no. 3, pp. 64-78.

Reichherzer, T.R., Cañas, A.J., Ford, K.M., Hayes, P.J. (1998). The Giant : a Classroom Collaborator. Proceedings of Workshop on Pedagogical Agents, Fourth International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'98, San Antonio, Texas, USA, August 16-19.

Rickel, J., Johnson, L.W. (1998). Animated Pedagogical Agents for Team Training. Proceedings of Workshop on Pedagogical Agents, Fourth International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'98, San Antonio, Texas, USA, August 16-19.

Rickel, J., Johnson, L.W. (1997). Intelligent Tutoring in Virtual Reality : a Preliminary Report. Proceedings of Workshop V on Pedagogical Agents, Eighth International Conference on Artificial Intelligence in Education, AIED 97, Kobe, Japan, August 19.

Rouane, K. (1998). Étude et réalisation d'un environnement de développement de curriculum. Mémoire de maîtrise, Département d'Informatique et de Recherche Opérationnelle, Université de Montréal.

Ryder, J.M. (1998). Pedagogical Agents for Performance Monitoring, Cognitive Diagnosis, and Remediation. Proceedings of Workshop on Pedagogical Agents, Fourth International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'98, San Antonio, Texas, USA, August 16-19.

Shortliffe, E.H. (1976). Computer Based Medical Consultations : MYCIN. Elsevier North Holland Inc.

Sleeman, D., Brown, J.S. (1982). Introduction: Intelligent Tutoring Systems. Intelligent Tutoring Systems . Sleeman D., Brown J.S. (eds.), New York, Academic Press, pp.1-11.

Sowa, J. (1992). Knowledge-Based Systems. Special Issue on Conceptual Graphs, vol. 5, no. 3, September.

Sowa, J. (1991). Toward the Expressive Power of Natural Language. Principles of Semantic Networks, Explorations in the Representation of Knowledge. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Mateo, California.

Specht, M., Weber, G., Heitmeyer, S., Schöch, V. (1997). AST: Adaptive WWW-Courseware for Statistics. Proceedings of Workshop on Adaptive Systems and User Modeling on the World Wide Web. Sixth International Conference on User Modeling, UM97, Chia Laguna, Sardinia, Italy, June 2. Brusilovsky P., Fink J., Kay J. (eds), Carnegie Mellon Online, pp. 91-95. Internet URL :
http://www.contrib.andrew.cmu.edu/~plb/UM97_workshop/Specht.html.

Stern, M., Woolf, B. P., Kuroso, J. (1997). Intelligence on the Web ? Artificial Intelligence in Education, Knowledge and Media in Learning Systems. Proceedings of Eighth World Conference on Artificial Intelligence in Education, Kobe, Japan, August 18-22, AIED'97. Du Boulay B., Mizoguchi R. (eds). Amsterdam, IOS Press, pp. 490-497.

Stone, B.A., Lester, J.C. (1996). Dynamically Sequencing an Animated Pedagogical Agent. Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence, pp. 424-431, Portland, August.

Internet URL:<http://www.csc.ncsu.edu/eos/users/l/lester/www/imedia/papers.html#agents>

Suthers, D., Jones, D. (1997). An Architecture for Intelligent Collaborative Educational Systems. Artificial Intelligence in Education, Knowledge and Media in Learning Systems. Proceedings of Eighth World Conference on Artificial Intelligence in Education, Kobe, Japan, August 18-22, AIED'97. Du Boulay B., Mizoguchi R. (eds). Amsterdam, IOS Press, pp. 55-62.

Swartout, W.R., Moore, J. (1993). Explanation in Second Generation Expert Systems. Second Generation Expert Systems. David J.M, Krivine, J.P., Simmons R. (eds), Springer Verlag, Berlin-New York, pp. 543-585.

Swartout, W.R. (1983). XPLAIN: A System For Creating And Explaining Expert Consulting Programs. Artificial Intelligence, vol. 21, pp. 285-325.

Swartout, W.R. (1977). A Digitalis Therapy Advisor with Explanations. MIT laboratory for Computer Science TR-176, Massachusetts Institute of Technology, February.

Swartout, W.R. (1977). A Digitalis Therapy Advisor with Explanations. Proceedings of the fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence, August.

Tanner, M.C. (1995). Task-Based Explanations. Expert Systems with Applications, vol. 8 no. 4, pp. 505-512.

VanLehn, K. (1996). Conceptual and Meta Learning during Coached Problem Solving. Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Vol. no 1086, Proceedings of Third International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'96, Montreal, June 12-14. Frasson C., Gauthier G., Lesgold A. (eds), Berlin, Springer Verlag, pp. 29-47.

VanLehn, K. (1988). Student Modeling. Foundations of Intelligent Tutoring Systems, Polson M.C., Richardson J.J.(eds), Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New Jersey, pp. 55-78.

Vassileva, J. (1997). Dynamic Course Generation on the WWW. Artificial Intelligence in Education, Knowledge and Media in Learning Systems. Proceedings of Eighth World Conference on Artificial Intelligence in Education, Kobe, Japan, August 18-22, AIED'97. Du Boulay B., Mizoguchi R. (eds). Amsterdam, IOS Press, pp. 498-505.

Warendorf, K., Tan, C. (1997). ADIS - An Animated Data Structure Intelligent Tutoring System or Putting an Interactive Tutor on the WWW. Proceedings of Workshop on Intelligent Educational Systems on the World Wide Web. Eighth World Conference on Artificial Intelligence in Education, AIED'97, Kobe, Japan, August 18, ISIR. Brusilovsky P., Nakabayashi K., Ritter S. (eds), pp. 54-60. Internet URL : http://www.contrib.andrew.cmu.edu/~plb/AIED97_workshop/Warendorf/Warendorf.htm

1.

Wenger, E. (1987). Artificial Intelligence and Tutoring Systems: Computational and Cognitive Approaches to the Communication of Knowledge. Los Altos, CA, Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Wick, M.R., Thompson, W.B. (1992). Reconstructive Expert System Explanation. International Journal of Artificial Intelligence, Vol. 54, pp. 33-70.

Winograd, T. (1971). A Computer Program for Understanding Natural Language, MIT, Artificial intelligence laboratory TR-17, Massachusetts Institute of Technology.

Zouaq, A. (2000). The Explanation Agent. Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Vol. no 1839, Proceedings of Fifth International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS'2000, Montreal, Canada, June 19-23. Gauthier G., Frasson C., VanLehn K. (eds), Berlin, Springer-Verlag, pp. 554-563.

Zouaq, A. (2000). Les Systèmes Tutoriels Intelligents. Rapport interne de l'entreprise Virtuel-Âge International Inc., Mars.

Zouaq, A. (2000). Les Agents Pédagogiques. Rapport interne de l'entreprise Virtuel-Âge International Inc., Mai-Juin.

URL1 =<http://www.cs.mdx.ac.uk/staffpages/serengul/Overlay.student.models.htm>

URL2 =<http://www.cs.mdx.ac.uk/staffpages/serengul/Differential.student.models.htm>

URL3 =<http://www.cs.mdx.ac.uk/staffpages/serengul/Perturbation.student.models.htm>

URL5 =<http://www.csc.ncsu.edu/degrees/undergrad/Reports/jlelliot/>

URL6 =<http://www-aml.cs.umass.edu/~stern/webits/itsworkshop/brusilovsky.html>

URL7 =<http://www.acm.org/crossroads/xrds5-1/explain.html>

URL8 =<http://www.lemonde.fr/s/billjoy/billjoy.rtf>

URL9 =

<http://www.cs.mdx.ac.uk/staffpages/serengul/Traditional.Computer.Aided.Learning.Systems.htm>

URL10 = <http://www.cs.mdx.ac.uk/staffpages/serengul/Student.model.diagnosis.htm>

URL11 =

<http://www.cs.mdx.ac.uk/staffpages/serengul/The.curriculum.and.diagnosis.module.htm>

URL12 = <http://www.iro.umontreal.ca/~nie/IFT6255/Introduction.html>

URL13= <http://www.uidaho.edu/evo/dist1.html>

ANNEXE A QUESTIONNAIRE SOUMIS AUX

CONCEPTEURS DE COURS

- Convivialité de l'interface ;
- Facilité d'utilisation des outils d'édition de cours ;
- Rapidité de création d'un cours de façon générale ;
- Rapidité et facilité de création des explications en particulier ;
- Les différents types d'exercices répondent-ils aux besoins des concepteurs de façon générale ?
- En particulier, les problèmes à étapes sont-ils utiles ?
 - ⇒ Le symbole * dans les problèmes à étapes a été utile ?
 - ⇒ Est-il utile d'avoir une description détaillée de l'action ?
- Les mises à jours de cours en général, et des explications en particulier sont-elles faciles à effectuer ?
- La philosophie globale qui sous-tend l'utilisation des graphes conceptuels dans les explications est-elle compréhensible ? leur mise en œuvre est-elle ardue (création, mises à jour)?
- Le fait de tracer un graphe conceptuel permet-il d'avoir une idée plus précise de ce que l'on veut expliquer ? si oui, les concepteurs ont-ils déjà remodelé une explication suite à l'utilisation d'un graphe conceptuel, et cela, même avant de la soumettre aux apprenants ?
- En ce qui concerne l'éditeur de concepts, les concepteurs ont-ils été satisfaits par la liste des concepts générés ? dans tous les cas, a-t-il été facile de la modifier ?
- En ce qui concerne l'éditeur de liens, les concepteurs ont-ils été aidés par les liens prédéfinis ? par les liens créés par d'autres concepteurs ?
- Les graphes d'analyse générés par l'agent ont-ils paru lisibles aux concepteurs? Les ont-ils aidés à corriger leurs explications ? les concepteurs ont-ils d'autres suggestions quant aux conseils que l'agent pourrait leur prodiguer ?
- Autres suggestions ?

ANNEXE B QUESTIONNAIRE SOUMIS AUX APPRENANTS

- Convivialité de l'interface ;
- Facilité d'utilisation de l'outil de présentation de cours ;
- Les conseils de l'agent explicatif ont-ils été pertinents ? l'agent vous a-t-il aidé dans votre résolution d'exercices ?
- Avez-vous été aidé par la présentation des causes d'erreur possibles lorsque vous avez commis une erreur ? ou cela vous a-t-il au contraire perturbé ?
- Jugez-vous que les explications présentées étaient adaptées à votre modèle d'apprenant, ou encore qu'elles étaient accessibles en terme de connaissances utilisées, de niveau de détail ?
- Avez-vous apprécié que l'agent intervienne sans être sollicité ? auriez-vous souhaité pouvoir contrôler son apparition ? auriez-vous souhaité le faire disparaître complètement ?
- La personnalisation de l'agent a-t-elle apporté un plus ? si non, vous a-t-elle dérangé ?
- Auriez-vous souhaité que l'agent soit muet ? en d'autres termes, le fait que l'agent « parle » vous a-t-il dérangé, amusé, laissé indifférent ?
- Les expressions de l'agent vous ont-elles perturbé, amusé, laissé indifférent ?
- Avez-vous apprécié un type d'exercice particulier ? en ce qui concerne les problèmes à étapes, avez-vous une suggestion ou une recommandation particulière (interface, principe, utilité) ?
- Que pensez-vous des graphes conceptuels ? avez-vous trouvé ardu de schématiser une explication sous forme de graphe conceptuel ?
- Auriez-vous préféré utiliser une terminologie qui vous soit propre plutôt que d'utiliser les concepts et liens définis par le concepteur du cours ?
- Pensez-vous qu'utiliser un graphe conceptuel puisse encore plus perturber votre compréhension de l'explication ?

- Ne pensez-vous pas qu'une aide sur la construction des graphes conceptuels pourrait être appréciable ?
- Le fait d'avoir à tracer un graphe conceptuel pour toutes les explications présentées en fin de session ne vous a-t-il pas paru non approprié (oubli de l'explication, du contexte) ? n'aurait-il pas été préférable d'avoir à tracer un graphe conceptuel sous forme d'exercice, immédiatement après la détection par le système de l'incompréhension ?
- Autres remarques ?