



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Evaluation et guidage d'un utilisateur dans un environnement d'apprentissage. Application au domaine de la rééducation de la parole.

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 27 Mai 2000

pour l'obtention du

Doctorat de l'université Henri Poincaré – Nancy 1
(spécialité Informatique appliquée à la Psychologie Cognitive)

par

Virginie Govaere

Composition du jury

Président : Alain Trognon, Professeur à Nancy 2

Rapporteurs : Monique Grandbastien, Professeur UHP
Esma Aimeur, Professeure agrégée à l'Université de Montréal
Francis Loewenthal, Professeur à l'Université de Mons

Examineurs : Marie-Christine Haton, Professeur UHP, directeur de thèse
Jean-Paul Haton, Professeur UHP

Table des matières

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Table des figures | v |
| Introduction générale | 1 |
| I Etat de l'art | 5 |
| Introduction | 7 |
| 1 Les connaissances à acquérir | 9 |
| 1.1 Nature des connaissances à acquérir | 9 |
| 1.1.1 La conception structuraliste | 10 |
| 1.1.2 La conception cognitive de première génération | 11 |
| 1.1.3 La conception cognitive de seconde génération | 12 |
| 1.1.4 La conception contextualiste | 13 |
| 1.2 Théories ou facteurs d'apprentissage? | 15 |
| 1.2.1 Les facteurs d'apprentissage | 15 |
| 1.3 Les connaissances à acquérir au travers des environnements informatiques | 20 |
| 1.3.1 Les environnements d'apprentissage | 21 |
| 1.3.2 Organisation des connaissances : le module de l'expert | 23 |
| 1.3.3 La modélisation des connaissances à acquérir | 25 |
| 1.4 Bilan et ouverture | 29 |
| 2 Les connaissances acquises | 31 |
| 2.1 Les phénomènes de rétention et d'oubli | 31 |
| 2.1.1 L'apprentissage | 32 |
| 2.1.2 Le stockage | 33 |
| 2.1.3 L'encodage, la consolidation et la récupération | 34 |
| 2.1.4 L'oubli | 34 |
| 2.1.5 Un premier bilan | 35 |

| | | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2 | La modélisation des connaissances de l'apprenant dans un tuteur | 36 |
| 2.2.1 | Le modèle de l'élève : Quoi et où? | 36 |
| 2.2.2 | Modélisation de l'état cognitif de l'apprenant | 38 |
| 2.2.3 | Modélisation des connaissances dans le profil de l'élève | 41 |
| 2.2.4 | Un premier bilan | 49 |
| 2.3 | Bilan et ouverture | 49 |
| 3 | Acquérir des connaissances, oui mais comment? | 51 |
| 3.1 | Mécanismes et types d'apprentissage | 51 |
| 3.1.1 | Les mécanismes de l'apprentissage | 51 |
| 3.1.2 | Méthodes ou types d'apprentissage | 52 |
| 3.2 | L'acquisition de connaissances ou une activité de résolution de problème | 53 |
| 3.2.1 | Une activité finalisée | 54 |
| 3.2.2 | L'évaluation : facteur central de l'acquisition | 54 |
| 3.3 | Existant et difficultés dans les tutoriels | 55 |
| 3.3.1 | Évaluation et guidage dans un système informatique d'apprentissage | 55 |
| 3.3.2 | Le système d'aide et les stratégies pédagogiques | 67 |
| 3.4 | Bilan et ouverture | 70 |
| | Conclusion | 73 |
| II | Une proposition théorique et pratique : le système GEREV | 75 |
| | Introduction | 77 |
| 4 | De SIRENE à ...SIRENE et GEREV | 79 |
| 4.1 | Au commencement, il y avait SIRENE... | 80 |
| 4.1.1 | Une rétroaction visuelle : Quels signaux visualiser? | 80 |
| 4.1.2 | Une visualisation organisée | 82 |
| 4.1.3 | Une rétroaction visuelle permise par une analyse vocale technique | 86 |
| 4.1.4 | Bilan des services proposés par SIRENE | 87 |
| 4.2 | ... Puis vint GEREV ! | 87 |
| 4.2.1 | GEREV : ses objectifs | 87 |
| 4.2.2 | Oui mais comment? | 88 |
| 4.2.3 | GEREV : son architecture | 91 |
| 4.2.4 | GEREV : ses particularités | 94 |
| 4.2.5 | GEREV : un automate de fonctionnement | 95 |
| 4.2.6 | GEREV : bilan | 98 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3 | Un modèle théorique : Pourquoi? Lequel? | 99 |
| 4.3.1 | Les principes psychologiques sous-jacents de GEREV | 100 |
| 4.3.2 | Difficulté de combinaison de l'approche psychologique et informatique | 102 |
| 5 | Représentation des connaissances | 103 |
| 5.1 | Les connaissances manipulées | 103 |
| 5.2 | La représentation tout en nuance d'une connaissance : la qualification floue | 104 |
| 5.2.1 | Avantages | 105 |
| 5.2.2 | Inconvénient | 107 |
| 5.2.3 | Bilan de l'utilisation du flou | 107 |
| 5.3 | Une représentation unifiée : les schémas | 107 |
| 5.3.1 | Le module de l'expert | 108 |
| 5.3.2 | Le module de l'élève | 109 |
| 5.3.3 | Quelle validité pour cette unification? | 110 |
| 5.4 | Application dans GEREV | 110 |
| 5.5 | Bilan | 111 |
| 6 | Diagnostic, Synthèse : un défi! | 115 |
| 6.1 | Évaluation initiale | 115 |
| 6.1.1 | Une évaluation initiale : oui, mais quel intérêt? | 116 |
| 6.1.2 | Une évaluation initiale : mise en œuvre et difficultés | 117 |
| 6.2 | Évaluation : une première étape vers la représentation de l'état cognitif de l'utilisateur | 126 |
| 6.3 | Évaluation à deux niveaux : les facteurs primaires et secondaires | 129 |
| 6.3.1 | Les avantages de cette distinction | 130 |
| 6.3.2 | Facteurs primaires et secondaires : une réalisation concrète. | 131 |
| 6.4 | La synthèse des informations | 132 |
| 6.4.1 | L'évolution des connaissances en fonction du temps | 133 |
| 6.4.2 | Prise en compte du bruit? | 134 |
| 6.4.3 | Bilan des processus de modélisation de l'élève-utilisateur | 136 |
| 7 | Guidage : une tâche, un sujet, un conseil | 137 |
| 7.1 | Le guidage : un parcours de tâches | 138 |
| 7.1.1 | Le guidage inter-tâche | 138 |
| 7.1.2 | Le guidage intra-tâche | 146 |
| 7.2 | Le guidage : un apport d'aides | 149 |
| 7.2.1 | Des conseils, des recommandations, des renforcements : une nécessité, des effets | 149 |
| 7.2.2 | Et l'adaptation à l'utilisateur? | 152 |

| | |
|------------------------------------------------------------|------------|
| 8 Implantation informatique de GEREV | 155 |
| 8.1 Les choix effectués | 155 |
| 8.2 Deux applications : leur fonctionnalité | 155 |
| 8.2.1 Une application pour l'expert, Expert2.jpr | 155 |
| 8.2.2 Une application patient, Expert.jpr | 162 |
| 8.3 Quand est-il de l'aspect technique? | 166 |
| 8.3.1 Le fonctionnement général | 166 |
| 8.3.2 L'application "Expert" | 168 |
| 8.3.3 L'application "Patient" | 169 |
| | |
| Conclusion | 171 |
| | |
| Conclusion Générale : Y A-T'il Une Vie Après Gerev? | 173 |
| | |
| Perspectives | 179 |
| | |
| Bibliographie | 181 |

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY

Table des figures

| | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.1 | Relation entre motivation et degré de performance selon Yerkes et Dodson | 17 |
| 1.2 | Taxonomie schématique des environnements d'apprentissage d'après P. Mendelsohn [Mendelsohn 95] | 21 |
| 1.3 | Extrait du réseau sémantique de SCHOLAR issu de Wenger [Wenger 87] | 26 |
| 1.4 | Exemple de règle de production dans MYCIN | 27 |
| 1.5 | Schéma des représentations de connaissances expertes à l'aide de la logique probabiliste | 28 |
| 1.6 | Second exemple de règles de production dans MYCIN | 29 |
| 2.1 | Modélisation par recouvrement | 38 |
| 2.2 | Modélisation par perturbation | 40 |
| 2.3 | Modélisation par primitives | 41 |
| 2.4 | Représentation, à l'aide de la logique floue, du degré de familiarité pour une connaissance dans XTRA-TE | 43 |
| 2.5 | Modélisation différentielle | 46 |
| 2.6 | Modélisation différentielle d'une entité | 46 |
| 3.1 | Le processus de résolution de problème selon Wenger [Wenger 87] | 58 |
| 3.2 | Le diagnostic générer et tester | 60 |
| 4.1 | Une proposition de réalisation dans l'exercice "Maîtrise du fondamental" | 83 |
| 4.2 | Représentation de l'enchaînement des exercices prévu dans SIRENE | 84 |
| 4.3 | Illustration de l'importance de la prosodie dans la compréhension du français | 85 |
| 4.4 | Vue d'un des panneaux de l'interface de GEREV | 92 |
| 4.5 | Relations entre GEREV, SIRENE et ses utilisateurs | 93 |
| 4.6 | Schéma général de présentation du système GEREV | 96 |
| 4.7 | Développement du cadre A : système d'Initialisation/Consultation des profils | 97 |
| 4.8 | Développement du cadre B et C : système d'évaluation et de guidage | 99 |
| 5.1 | Un domaine D , ses ensembles flous E , et leur fonction d'appartenance | 104 |
| 5.2 | Passage d'une fonction à une distribution trapézoïdale | 105 |
| 5.3 | Prototype de connaissance du module de l'expert | 108 |
| 5.4 | Prototype de connaissance-élève | 109 |
| 5.5 | Schéma de l'aptitude "stabilité du fondamental" | 111 |
| 5.6 | Modélisation des connaissances dans notre système | 112 |
| 6.1 | Expressions syntaxiquement différentes mais sémantiquement équivalentes? | 118 |
| 6.2 | Deux cas : réponses équivalentes, réponses différentes | 121 |
| 6.3 | Schéma de détermination de l'évaluation qualitative initiale | 125 |
| 6.4 | Représentation de l'évolution du poids en fonction du temps | 133 |

| | | |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.5 | Schéma des étapes générales dans la mise à jour du profil de l'utilisateur | 135 |
| 7.1 | Énoncé de l'exercice "Maîtrise du souffle" | 140 |
| 7.2 | Visualisation d'une réponse d'un sujet dans l'exercice "Maîtrise du souffle" | 141 |
| 7.3 | Schéma du graphe des exercices dans GEREV | 142 |
| 7.4 | Schéma général de fonctionnement des processus d'assimilation et d'accommodation | 144 |
| 7.5 | Schéma de fonctionnement du guidage au niveau des paramètres primaires | 145 |
| 7.6 | Schéma du fonctionnement du guidage intra-tâche | 147 |
| 7.7 | Schéma de l'influence des paramètres secondaires sur le guidage | 148 |
| 7.8 | Schéma de fonctionnement de présentation des conseils et des renforcements | 151 |
| 8.1 | Rubrique "Dossier" de l'application dédiée à l'expert | 156 |
| 8.2 | Constitution de l'état civil pour un profil utilisateur | 157 |
| 8.3 | Fenêtre de présentation du niveau des paramètres de la voix | 159 |
| 8.4 | Création d'un historique lors l'initialisation du profil | 160 |
| 8.5 | Menu d'information du fonctionnement et de l'utilisation de GEREV | 161 |
| 8.6 | Menu de visualisation des exercices de SIRENE | 162 |
| 8.7 | Fenêtre de saisie de l'identité du patient et de son mot de passe | 162 |
| 8.8 | Menu d'ouverture d'une session | 163 |
| 8.9 | Simulation du contrôle de l'état des paramètres | 163 |
| 8.10 | Choix de l'exercice sans modèle | 164 |
| 8.11 | Simulation de la production d'une réponse par paramètre | 164 |
| 8.12 | Prise en compte des paramètres secondaires | 165 |
| 8.13 | Calcul de la moyenne théorique d'un paramètre | 165 |
| 8.14 | Catégorisation de la production du sujet sous forme de vecteur | 166 |
| 8.15 | Renforcement des réponses des utilisateurs | 166 |
| 8.16 | Établissement d'un paramètre | 167 |
| 8.17 | Exemple de fenêtre contenant un message d'erreur | 168 |
| 8.18 | Les dépendances entre les classes pour l'application "Expert" | 169 |
| 8.19 | Les dépendances entre les classes pour l'application "Patient" | 169 |
| 8.20 | Un paramètre | 170 |

Introduction générale

Avec les développements techniques des ordinateurs et leur entrée dans le quotidien de tout un chacun, ces formidables outils sont devenus davantage que de simples calculateurs. On les utilise aujourd'hui pour des tâches de plus en plus complexes. L'un des domaines dans lequel ils occupent une place grandissante est celui de l'éducation.

En 25 ans, les systèmes informatiques dédiés à cette optique sont passés de répéteurs (EAO) dans lesquels les exercices et les solutions étaient pré-enregistrés à des ersatz de tuteur humain (EIAO¹ ou ICAI²). Ces derniers sont censés afficher un comportement plus proche de celui d'un tuteur humain - plus intelligent, d'où la dénomination de TI (Tuteur Intelligent) - que ne le font les systèmes d'EAO.

Un tuteur, humain ou non, est un système capable de s'adapter aux connaissances et aux possibilités de l'élève tant au niveau du choix dans la progression pédagogique, c'est-à-dire des connaissances à aborder et de leur succession, qu'à celui de l'aide à lui fournir. Trois mondes distincts devant interagir, sont alors à envisager dans l'élaboration d'un système informatique de ce type :

- le monde des connaissances à acquérir qu'il faut modéliser de la manière la plus exhaustive possible. Il ne suffit pas de modéliser la somme des connaissances du domaine manipulé, il faut également que celles-ci soient appréhendables par la population d'élèves visée. De plus, un domaine de connaissances ne se limite pas aux seules connaissances correctes. Il faut lui adjoindre des connaissances qui vont permettre de catégoriser toutes les réponses du sujet, c'est-à-dire de typer les réponses du sujet en, au moins, réponses correctes/réponses erronées. En effet, le monde des connaissances à acquérir constitue l'ensemble des connaissances de référence auquel il faut confronter chaque réponse de l'élève. Si une réponse juste ou erronée ne peut être rapprochée, ne serait-ce que partiellement, d'une connaissance du domaine aucune adaptation n'est possible ;
- le monde du pédagogue qui, à partir de connaissances stratégiques et tactiques, met en place une progression pédagogique en tenant compte à la fois du domaine de connaissances mais aussi des connaissances actuelles du sujet ;
- le monde de l'élève qu'il faut modéliser pour connaître l'état du sujet à un instant donné. En effet, comment s'adapter à un élève si celui-ci nous est inconnu ? Dans ce monde, encore plus que dans les précédents, les tuteurs sont confrontés aux problèmes de la fiabilité de la modélisation et de la prise en compte des évolutions de ses états dans le temps.

Chacun des mondes présente des spécificités et des difficultés propres qui sont encore accentuées par l'indispensable prise en compte des deux autres.

1. Initialement, deux significations ont été retenues pour le sigle EIAO : celle d'Environnement Interactif d'Apprentissage avec Ordinateur et celle d'Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur. La première approche de l'utilisation de l'ordinateur comme outil de transmission de connaissances s'appuie principalement sur les capacités multimédia et sur la manipulation interactive qui sont offertes par les ordinateurs. La seconde se base explicitement sur la notion d'enseignement et donc de guidage de l'élève. Actuellement, la tendance est à l'utilisation de la notion d'interactivité au sens de communication et d'adaptation à l'utilisateur au sens de guidage et d'aide fournies. Dans ce document, nous nous appuyerons sur cette dernière conceptualisation des EIAO.

2. Intelligent Computer-Assisted Instruction.

Ces trois mondes font l'objet de travaux dans différentes disciplines que sont l'Informatique, les Sciences de l'Education, la Psychologie et les Sciences Cognitives de manière globale. La conception d'un EIAO est, par essence, pluridisciplinaire dans la mesure où les compétences en œuvre dans l'élaboration d'un tel système relèvent de domaines techniques et humains relatifs à des disciplines variées. Toutefois, quelle que soit la discipline considérée, l'élaboration des logiciels n'est pas facilitée par des résultats précis et utilisables pour cette problématique, qu'il s'agisse de la Psychologie (Qu'est-ce que l'apprentissage, comment sont représentées les connaissances chez un sujet?), des Sciences de l'Education (comment enseigner?, quelles stratégies pédagogiques adopter?) ou de l'Informatique (quel formalisme adopter pour simuler le comportement, quelles techniques de représentation des informations utiliser pour stocker les connaissances humaines?).

De plus, les méthodes et les objectifs de chaque composante (Sciences Humaines ou Informatique) partie prenante des EIAO sont différents. L'une veut valider un modèle de fonctionnement cognitif [Anderson 90] ou pédagogique, l'autre s'applique à constituer un logiciel présentant certaines fonctionnalités sans parfois s'attacher aux principes cognitifs.

Ainsi, au travers de cette thèse, nous tentons de marier ces différentes conceptions en envisageant conjointement les apports des disciplines précédemment citées pour les trois mondes constituant le centre de notre problématique. Cette union a pour fonction d'optimiser le guidage et l'adaptation à l'utilisateur. Ces deux aspects sont à considérer ici sous la double facette que sont l'enchaînement des tâches et l'apport d'aide permettant de rapprocher la réponse de l'élève de celle attendue. Cette double facette est fondamentale dans l'autonomisation et la prise en charge de l'apprentissage par l'utilisateur qui n'est possible que si le système permet une rétroaction efficace et pertinente par rapport à ses possibilités. La rétroaction à fournir consiste en une prise en compte d'une progression pédagogique issue d'une analyse *a priori* de l'expert du domaine mais aussi d'une construction dynamique de conseils ou/et de recommandations à fournir au sujet pour améliorer sa performance. Nos propositions sont donc à envisager sous l'éclairage d'un apport conceptuel et stratégique plutôt que sous celui d'avancées technologiques dans la conception d'un tuteur. En effet, même si une réalisation logicielle est proposée (pour un développement particulier et précis de ce point, consulter le chapitre 8 intitulé "Implantation informatique de GEREV"), elle ne révolutionne pas les techniques existantes dans les différents systèmes mais a pour objectif d'illustrer l'applicabilité des principes de guidage reposant sur la prise en compte de l'utilisateur et de ses connaissances à un moment donné de la progression éducative.

Le principe fondamental mis en exergue dans notre travail est le recours et l'utilisation de la notion d'étayage dans le processus d'enseignement. Ceci se traduit par une volonté constante d'adapter la rétroaction au niveau actuel du sujet pour chaque connaissance particulière. L'adaptation n'est possible qu'au travers d'une évaluation fidèle de toutes les réponses du sujet tant en ce qui concerne celles mettant directement en œuvre les connaissances en cours d'enseignement que celles intervenant dans la réponse mais indirectement sollicitées.

Le domaine d'application retenu est celui de la rééducation de la parole pour non-entendants. Deux domaines, objectifs et limites doivent être définis dans ce cadre. D'une part celui de la rééducation et d'autre part celui de la parole.

Dans le premier domaine, l'acquisition des connaissances se réalise avec une population présentant une détérioration du comportement faisant l'objet de la rééducation. Les spécificités de ce type d'apprentissage sont liées à la limitation des progrès envisageables, à la limitation physique inhérente à la déficience et au temps nécessaire à la "réussite" de cette entreprise rééducative. Par conséquent, il est difficilement concevable d'avoir recours à un système informatique ne présentant pas de fonctionnalités permettant la prise en compte, tout au moins à un moment donné, de la limitation de l'évolution des connaissances du sujet ainsi que de l'évolution lente et progressive des performances mesurées.

En ce qui concerne le second domaine, celui de la parole, la définition précise des connaissances mises en œuvre dans sa production lors d'une production intelligible et de bonne qualité est complexe. En effet, il ne suffit pas de considérer chaque paramètre physique intervenant dans la production pour délimiter ce qu'est une parole de bonne qualité, il faut également tenir compte de leur combinaison, du contexte dans lequel le comportement langagier est émis, des phénomènes compensatoires . . .

Étant donné l'objectif de notre travail sur un plan théorique, le domaine d'application retenu, nous abordons plusieurs domaines de recherche ou disciplines intervenant conjointement dans notre travail avec plus ou moins de force. Ces disciplines sont :

- l'Informatique ou l'Intelligence Artificielle ;
- la Psychologie cognitive et les Sciences de l'Éducation ;
- la Rééducation vocale et l'Orthophonie pour les aspects plus pratiques ;
- le domaine de la Reconnaissance de la parole comme techniques mises en œuvre au travers du domaine appliqué retenu.

Ce manuscrit est composé de parties distinctes qui se constituent d'une part de l'état de l'art et d'autre part de nos propositions théoriques et pratiques. La dernière partie s'achève sur une conclusion et des perspectives.

Nous présentons, dans la première partie, un tour d'horizon des apports et de l'existant tant au niveau des sciences humaines (Psychologie et Sciences de l'Éducation) qu'à celui de l'Informatique et de ses réalisations.

Ceci est mis en œuvre pour les connaissances du domaine au travers du chapitre 1 "Connaissances à acquérir", pour la modélisation de l'utilisateur au travers des "Connaissances acquises" (chapitre 2) et finalement, pour les média d'acquisition au travers du chapitre 3 intitulé "Acquérir des connaissances, oui mais comment?"

Dans une seconde partie, nous exposons nos propositions théoriques mais aussi pratiques par l'intermédiaire du système GEREV (Guidage et Évaluation dans un environnement de Rééducation Vocale). Notre contribution repose sur une tentative "d'humanisation" [Abou-Jaoude 99] d'un système par le biais de la notion d'étayage et par une modélisation qualitative des connaissances de référence. Ceci est proposé, dans notre système, grâce au recours à une représentation des connaissances sous forme de qualification floue qui va permettre une évaluation qualitative des réponses du sujet. Cette évaluation se fait par rapport aux connaissances de référence (externalisation de la norme) mais également par rapport aux réponses précédentes du sujet (internalisation de la norme). Le guidage quant à lui résulte pour la succession des tâches, d'un parcours dans un graphe de tâches et pour la détermination de la rétroaction (conseils et recommandations), de l'évaluation qualitative de la réponse du sujet.

Cette partie se constitue de quatre chapitres qui amènent le lecteur du chapitre traitant de la présentation du contexte et des objectifs de notre travail (chapitre 4) à l'apport d'un guidage adapté à l'utilisateur (chapitre 7).

L'application retenue illustre bien le nécessaire balancement entre l'homme et la machine et ceci au travers de l'objectif même du système qui est l'acquisition d'une voix intelligible, de bonne qualité pour des sujets en phase de rééducation. Le contexte théorique, applicatif, la première difficulté soulevée dans notre travail, la représentation d'un domaine de référence souple ainsi que les solutions proposées sont détaillés dans les chapitres 4 (De SIRENE à . . . SIRENE et GEREV) et 5 (Représentation des connaissances).

Une fois la phase de représentation de connaissances mise en œuvre, il faut alimenter le système d'apprentissage par un apport de nouvelles connaissances. En effet, l'adaptation d'un tel système à un

utilisateur n'est possible que dans le cas d'une base de connaissances pertinentes sur cet utilisateur. Nous définissons la pertinence de ces dernières à la fois par leur utilisabilité et leur proximité temporelle.

L'apport constant de nouvelles connaissances n'est possible qu'au travers de l'utilisation d'un mécanisme efficace d'évaluation des connaissances et de synthèse de ces dernières. Ces mécanismes sont d'autant plus centraux que dans le cadre de la rééducation, l'intervention est à considérer sur un intervalle de temps important. Elle amène dans certain cas une évolution importante des connaissances et de leurs manifestations. Nous envisageons ces aspects dans le chapitre 6 intitulé 'Diagnostic, Synthèse : un défi!'

A l'issue de ces trois chapitres, le guidage de l'utilisateur peut avoir lieu dans des conditions normales. Nous proposons dans le chapitre 7 ('Guidage : une tâche, un sujet, un conseil'), les propositions et la réalisation (chapitre 8) que nous avons mise en œuvre dans l'optique d'un guidage individualisé et reprenant le niveau du sujet.

Nous fournissons ensuite une présentation des réalisations informatiques mises en œuvre au travers de cette thèse. Nous terminons ce manuscrit par une conclusion et quelques propositions en guise de perspectives.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY

Première partie

Etat de l'art



Introduction

Dans cette première partie, nous envisageons le processus d'acquisition de connaissances selon trois points de vue distincts mais complémentaires. Ces derniers se situent :

- au niveau des connaissances à acquérir (chapitre 1) ou d'une certaine manière au niveau du contenu à enseigner ;
- au niveau des connaissances acquises ou de l'élève (chapitre 2) ;
- au niveau des moyens pédagogiques mis en œuvre pour permettre une acquisition (chapitre 3).

Ces trois points de vue sont abordés à la fois sous l'angle du sujet en tant que sujet psychologique et sous l'angle informatique au travers des apports, limites et problématiques des systèmes et travaux existants.

La démarche que nous suivons est constante dans cette partie. Pour chacun de ces points de vue, nous tentons de présenter une vision synthétique des processus cognitifs à prendre en considération. Dans un second temps, nous exposons la manière dont les travaux en informatique ont envisagé de prendre en compte ces processus. Ensuite, les limitations sont présentées et amènent en quelque sorte, une justification des choix que nous faisons et développons dans la seconde partie du manuscrit.

Chapitre 1

Les connaissances à acquérir

Nous définissons ici un processus d'acquisition comme une séquence d'événements à l'issue de laquelle un système, naturel ou artificiel, se modifie de telle sorte que ses comportements deviennent plus adaptés pour atteindre les buts qu'il poursuit. Lors de ce processus, le système subit des modifications qui peuvent être structurelles, quantitatives, qualitatives . . . , qui lui permettent d'effectuer, par la suite, plus efficacement une même tâche, ou une tâche de même nature ; l'adjonction d'une connaissance ou d'une propriété va modifier l'état de connaissances du sujet.

Une situation d'apprentissage implique nécessairement une certaine interaction du système avec l'environnement (physique, social). Cette situation peut être caractérisée d'une part par la nature des connaissances à acquérir pour lesquelles on peut distinguer l'acquisition de Savoir et celle de Savoir-faire (section 1.1) et d'autre part, par le type d'interactions avec l'environnement externe (que nous développons dans le dernier chapitre de cette première partie).

L'étude des connaissances, de l'organisation de celles-ci chez un sujet fait partie du domaine d'étude de la psychologie. Dans cette optique, les chercheurs tentent de définir des invariants, de définir les limites des théories émises . . . , et donc de modéliser une organisation de connaissances permettant d'expliquer un comportement. Ainsi, nous choisissons de traiter de la nature des connaissances dans un premier temps puis, nous proposons ensuite une lecture particulière des facteurs influant sur l'apprentissage, que ce soit un facteur interne au sujet en phase d'acquisition ou externe tel que la qualité de la connaissance à acquérir. Nous terminons enfin ce premier chapitre par un tour d'horizon des travaux réalisés sur les systèmes informatiques et portant sur les connaissances à acquérir en envisageant les environnements d'apprentissage possibles mais également leur organisation et modélisation.

1.1 Nature des connaissances à acquérir

Lorsque l'on s'intéresse au problème de l'acquisition de connaissances, une distinction est généralement admise entre Savoir et Savoir-faire. Toutefois, cette dichotomie revêt, selon les conceptions théoriques envisagées, des aspects variés (intelligence verbale *versus* intelligence pratique, sensorimotrice *versus* représentative, ou plus récemment procédural-déclaratif). Outre les aspects que cette dichotomie peut prendre, le rôle des Savoir et des Savoir-faire sont différents selon les conceptions envisagées. Savoir et Savoir-faire peuvent être pour certains auteurs deux types de connaissance alors que, pour d'autres, ce sont deux états d'une même connaissance. Au niveau des processus d'apprentissage, ces conceptions variées induisent des pratiques différentes. Nous avons choisi, avant tout autre développement, d'exposer les principales conceptions sur la nature des connaissances à acquérir.

1.1.1 La conception structuraliste

Cette conception est issue des travaux de psychologues du développement tels que Wallon [Wallon 86], Bruner [Bruner 66, Bruner 90], Vygotsky [Vygotsky 78] ou encore Piaget [Piaget 74] entre autres. Selon eux, il existe plusieurs types d'intelligence qui sont sensorimotrice (Savoir-faire) et représentative (Savoir). Celles-ci entretiennent des rapports complexes : l'intelligence sensorimotrice est largement antérieure à l'acquisition des Savoir d'une part, et d'autre part, le passage de l'une à l'autre s'opère progressivement par un processus d'intériorisation des schèmes sensorimoteurs et suppose ainsi une reconstruction mentale des différentes étapes du développement de l'intelligence pratique. L'idée centrale de cette conception est que ce passage du sensorimoteur au Savoir représentatif est un processus d'abstraction complexe qui concerne l'accès à la fonction symbolique. Ce processus est présent également au centre du développement de la pensée à tous les âges de la vie. Il permet un passage des connaissances empiriques à un niveau d'abstraction et de généralisation suffisant pour permettre la réutilisation des connaissances dans d'autres situations.

Piaget [Piaget 74] soutient l'idée que l'action est un Savoir-faire autonome dont la conceptualisation s'effectue par prise de conscience ultérieure de la périphérie (des effets les plus visibles de l'action) vers le centre (coordination interne des actions). Au cours du développement, se mettrait en place un mouvement inverse, c'est-à-dire une influence de la conceptualisation sur l'action. Pour décrire ce mécanisme, il [Piaget 74] propose de distinguer trois étapes dans la gestion de ces échanges :

1. l'action est complètement autonome par rapport à la compréhension ;
2. l'action et la compréhension progressent simultanément ;
3. la compréhension se libère de l'action et la dirige.

On peut rapprocher ces étapes de la dichotomie entre les conduites dirigées par les données (*bottom-up* ou ascendante) et celles dirigées par les concepts (*top-down* ou descendante) [George 83].

Il y a acquisition de connaissances dans les trois étapes du modèle mais la maîtrise réelle de la connaissance et sa décontextualisation ne sont effectives qu'à partir de la dernière étape. Au niveau du processus en œuvre dans l'apprentissage de connaissances, l'assimilation et l'accommodation sont suffisants pour comprendre le fonctionnement du système.

L'accommodation et l'assimilation sont deux mécanisme d'un même processus. L'accommodation permet l'ajout d'une connaissance à un schème sans en modifier la structure (on assiste alors à une transformation quantitative du schème, des connaissances).

L'assimilation est le mécanisme qui permet de modifier qualitativement la structure des schèmes du sujet. En effet, les ajouts de connaissances par accommodation conduisent à une certaine incohérence entre les différents éléments du schème. L'assimilation va amener une reconstruction du schème qui permet d'intégrer de nouvelles connaissances et une évolution qualitative dans le développement du sujet. Nous verrons dans la suite de l'exposé que la conjonction de ces deux mécanismes permet d'expliquer les fluctuations de performances rencontrées lors des manipulations successives des connaissances.

En ce qui concerne la théorie de Bruner [Bruner 66], l'idée centrale est que l'apprentissage est un processus actif dans lequel les apprenants construisent des idées ou des concepts nouveaux à partir de leurs connaissances actuelles ou passées. Ainsi, il sélectionne et transforme de l'information, construit des hypothèses, prend des décisions et élabore des liaisons entre les concepts au niveau de la structure cognitive. Dans des travaux plus récents, Bruner [Bruner 86, Bruner 90] a étendu sa position théorique afin d'intégrer les aspects culturel et social de l'apprentissage.

Vygotsky [Vygotsky 78] présente la particularité théorique d'insister, au niveau du développement

de la cognition, sur le rôle fondamental de l'interaction sociale. Il affirme en 1978 [Vygotsky 78] :

Every function in the child's cultural development appears twice: first, on the social level, and later, on the individual level; first, between people (interpsychological) and then inside the child (intrapsychological). This applies equally to voluntary attention, to logical memory, and to the formation concepts. All the higher functions originate as actual relationships between individuals".

Le second aspect de la théorie de Vygotsky est l'idée que le potentiel de développement cognitif est limité à une période temporelle que l'on appelle la "zone de développement proximal"(ZDP). En outre, les développements durant la ZDP dépendent des interactions sociales. Le niveau de compétences pouvant être atteint avec l'aide d'un adulte ou au travers d'une collaboration avec un pair est plus important que celui pouvant être atteint seul.

Dans cette conception théorique, il faut donc retenir qu'il est indispensable de manipuler les concepts pour aboutir à une réelle compréhension de ceux-ci ; l'action est antérieure et primordiale dans l'élaboration des connaissances. Par conséquent, la manipulation directe des connaissances en contexte permet au sujet d'extraire des propriétés ou des lois des objets, qu'il faut ensuite décontextualiser pour les intégrer totalement dans le schème. De plus, l'acquisition de connaissances ne se réduit pas à l'adjonction de connaissances même si celle-ci est indéniable. Effectivement, l'évolution du système de connaissances peut aussi résider dans l'élimination d'une règle ou d'une hypothèse erronée, dans la substitution d'une procédure à une autre dont la validité est limitée. Deux autres mécanismes interviennent dans l'évolution du système de connaissances ; ce sont les mécanismes de *différenciation*, à savoir qu'une notion inséparable engendre deux notions distinctes, et *d'intégration* de deux notions initialement distinctes en une notion commune.

L'idée centrale est ainsi que l'acquisition des connaissances est un processus qui s'étale dans le temps, qui induit des modifications quantitatives et qualitatives. De plus, on ne peut parler d'une réelle acquisition que lorsque la structure des connaissances présente une telle abstraction que le sujet est à même de réutiliser ces connaissances dans des situations autres que celles dans lesquelles l'apprentissage a été réalisé.

1.1.2 La conception cognitiviste de première génération

Alors qu'avec les structuralistes la notion de développement est fondamentale, les cognitivistes reviennent à la substance même des connaissances au travers de GPS (*General Problem Solver*) et les travaux sur la modélisation informatique des processus de résolution de problème [Newell 63, Newell 72, Anderson 76]. Ici, la distinction Savoir et Savoir-faire laisse place à celle entre connaissances déclaratives et connaissances procédurales.

Les connaissances procédurales sont prescriptives et spécifiques dans leur usage. Elles consistent en associations entre des buts, des situations et des actions. Classiquement, les connaissances utilisées pour conduire une voiture, les algorithmes de calcul en arithmétique ou encore les méthodes de recherche de panne en électricité sont procédurales. Des notions comme procédures, règles de décision et résolution de problème sont associées aux connaissances procédurales.

Quant aux connaissances déclaratives, elles sont descriptives et indépendantes des usages. Elles représentent les faits et les principes tels que des lois de la physique, des noms de capitales Leur fonction est de communiquer des informations, de contrôler le déroulement de l'action et de procurer finalement un cadre pour la généralisation.

Anderson, dans son modèle ACT*ou *Adaptative Control of Thought* [Anderson 90], propose, par analogie avec les systèmes artificiels de traitement de l'information, un modèle de processus d'acquisition

de connaissances complètement formalisé. Il partage ce processus en quatre étapes :

1. une étape déclarative dans laquelle les connaissances apprises sont stockées en mémoire déclarative ; Anderson propose dans son modèle trois mémoires qui sont :
 - la mémoire déclarative pour stocker des connaissances sur les choses. Son utilisation requiert beaucoup d'attention et de temps ;
 - la mémoire procédurale pour les connaissances sur les procédures. Elle se situe à un niveau inconscient ; par conséquent, son utilisation est peu coûteuse en temps ;
 - la mémoire de travail pour la manipulation des connaissances contenues dans les deux mémoires précédentes. Son problème est son espace mémoire limité.
2. une étape associative dans laquelle l'élève applique principalement par analogie ces connaissances déclaratives aux nouvelles situations ;
3. une étape de compilation dans laquelle l'élève transforme la connaissance déclarative en connaissance procédurale spécifique du domaine. Cette conversion a lieu au fur et à mesure de l'utilisation par l'apprenant de cette connaissance. La transformation peut être réalisée principalement soit en créant une procédure spécifique d'un cas particulier à partir d'une connaissance générale (la procéduralisation), soit en réunissant plusieurs règles de production qui sont appliquées séquentiellement afin d'en obtenir une nouvelle qui atteint directement le but visé (la composition) ;
4. une étape de peaufinage dans laquelle les connaissances procédurales sont spécialisées ou généralisées selon les cas. Pour illustrer ce dernier point, nous proposons l'exemple du "planter de clou dans un support". En fonction, du support (le mur), le geste et la technique d'utilisation du marteau va varier. Deux types de mécanismes peuvent avoir lieu : la spécialisation en fonction du support et la généralisation du geste de planté un clou et de l'utilisation d'un marteau à partir des différentes utilisations dans une situation bien précise.

Nous nous retrouvons ainsi avec un modèle de l'acquisition quelque peu contradictoire par rapport à ce que nous avons précédemment décrit pour le développement en 1.1.1. A l'inverse du modèle piagétien, ce sont les connaissances déclaratives, les Savoir, qui sont antérieures aux connaissances procédurales, les Savoir-faire. De plus, Savoir et Savoir-faire ne sont que des représentations de la même connaissance sous différents états. Ils ne diffèrent donc pas par leur nature puisqu'ils restent formalisables par des règles de production.

Ce modèle est intéressant pour son approche et pour l'introduction de l'idée qu'une connaissance va, au travers de son utilisation dans différentes situations, s'automatiser et se transformer qualitativement pour permettre une utilisation efficace en terme de coût attentionnel.

1.1.3 La conception cognitiviste de seconde génération

Ici, nous restons dans une représentation des connaissances dans laquelle Savoir et Savoir-faire représentent les différentes formes de la connaissance [Richard 90]. On distingue trois types de représentations. Notre intérêt se portera plus particulièrement sur les représentations de type conceptuelles et celles liées à l'action.

Le premier type de représentations est celui des représentations "conceptuelles". Elles constituent le Savoir que nous avons sur la réalité. On distingue classiquement comme appartenant à cette classe de représentations :

- les concepts désignés par les mots du langage ;
- les relations entre ces concepts ;
- les réseaux complexes formés des interconnexions entre concepts (réseau sémantiques, schémas et scénarios).

Ces représentations sont solidaires du langage. Leur fonction est essentiellement de communiquer et de transmettre une information sur le réel.

Le second type de représentations est celui des représentations imagées [Denis 89, Paivio 71]. Elles ont une fonction essentielle dans les connaissances que l'on peut acquérir sur le réel puisqu'elles expriment les structures spatiales caractéristiques de la perception. Cependant, dans le cadre de l'opposition Savoir/Savoir-faire, elles ne concernent pas directement notre propos. Par conséquent, nous ne les développons pas.

Les dernières représentations, celles liées à l'action, sont formées des connaissances déclaratives que nous pouvons expliciter sur l'action et qu'il ne faut pas confondre avec l'action elle-même. Richard propose de distinguer dans celles-ci deux composantes. La première est la composante sémantique. C'est un Savoir qui permet d'évoquer simplement la signification de l'action par des verbes ou des expressions verbales tel que "sauter à la corde" ou "marcher". Cette première catégorie de connaissances sur l'action permet essentiellement de communiquer ou d'expliquer à quelqu'un l'action en cours et assez rarement comment la faire. Quant à la seconde composante, elle est plus intéressante pour notre propos puisqu'elle contient des représentations implicites liées à l'exécution des actions. Ces représentations permettent de contrôler le déroulement des actions sans que nous puissions vraiment en expliciter le contenu. En effet, nous vérifions les difficultés inhérentes à cette explicitation quand nous essayons de faire comprendre à un tiers comment réaliser une tâche simple comme nouer les lacets de ses chaussures ou s'agenouiller. Richard soutient cependant que les représentations d'actions ont la même organisation que les concepts malgré le fait que l'accès à la connaissance soit rendu difficile à la fois par le fait qu'elle est fortement solidaire de procédures très automatisées et par son organisation hiérarchique sur plusieurs niveaux. En effet, ces représentations portent :

1. sur le but de l'action ;
2. sur leur mode de réalisation (en particulier, la décomposition des actions en actions élémentaires) ;
3. sur les prérequis de l'action (c'est-à-dire sur les conditions à réaliser pour qu'une action puisse être déclenchée).

L'accès à ces trois niveaux d'information se fait, comme l'a proposé Piaget [Piaget 74], de la périphérie au centre. Les connaissances sur le but sont plus faciles d'accès que les connaissances sur le déroulement qui elles-mêmes précèdent les représentations sur les prérequis. En effet, si je demande à quelqu'un qui sort d'une pièce "Qu'est ce que tu fais ?", sa réponse ne portera probablement pas sur la description de sa démarche du type "je me lève de mon siège", "j'avance mon pied gauche"... , encore moins sur les conditions qui permettent cette action ("il y a une chaise, j'ai deux jambes, il n'y a pas d'obstacles infranchissables" ...), mais plus sûrement sur la signification de son geste ("je rentre chez moi").

Toutefois, comme l'a souligné Richard [Richard 90] en proposant ce modèle, si nous avons spontanément tendance à considérer comme distincts Savoir et Savoir-faire, c'est probablement parce que l'accès aux représentations sur l'action est très difficile à expliciter. Cela nous conduit plus ou moins à penser qu'ils sont indépendants et que l'on peut facilement fonctionner efficacement sans Savoir sur le Savoir-faire ou tout au moins sans conscience explicite de ce Savoir. Mais l'adhésion à cette position amène à oublier qu'à l'autre bout de la chaîne, l'expression du Savoir suppose aussi un certain Savoir-faire implicite.

1.1.4 La conception contextualiste

Ce courant de pensée part de l'idée très simple que les connaissances ne se trouvent ni dans la tête du sujet, ni dans les situations [Clancey 94]. Elles seraient l'expression d'un processus d'interaction

complexe. Elles mettent en scène un sujet, naturellement apte à saisir des régularités dans les scènes qu'il perçoit et le réel dans lequel il se meut et doit se faire comprendre. Le sujet apprend en participant à une "communauté de pratiques" qui contient indistinctement des Savoir et des Savoir-faire de toutes sortes intimement associés aux contextes qui leur donnent du sens.

En fait, un sujet placé dans un certain contexte apprend essentiellement à réagir par tous les moyens possibles pour se mettre en conformité avec la situation qu'on lui propose. Dans ce modèle, les connaissances sont l'expression de cette conformité et elles reflètent uniquement l'ordre ou le désordre du monde réel qui nous entoure. Bien que formé à raisonner, à l'aide d'outils formels puissants, il faut bien reconnaître qu'il nous arrive souvent de "bricoler" des solutions *ad hoc* dans les situations de la vie quotidienne comme dans la vie professionnelle. Pour cela, nous utilisons des outils qui sont à la portée de notre main, des artefacts, outils beaucoup plus rudimentaires mais souvent tout aussi efficaces que les modèles formels et abstraits.

Par conséquent, Savoir et Savoir-faire sont, en contexte, indifférenciés : les représentations n'existent pas en tant que telles en mémoire et toute action suppose une participation active du sujet à un ensemble contextualisé de pratiques qui fonde les connaissances et leur donne sens.

Cette conception est originale par rapport à celles citées précédemment. Là où les conceptions se rejoignent, c'est sur la nécessité de mise en contexte, de mise en pratique de tout "apprentissage".

Il n'y a apprentissage que lorsque le sujet est placé dans une situation dans laquelle il ne possède pas de comportement immédiatement adéquat.

Alors que dans la section précédente nous avons passé en revue les principaux courants théoriques qui envisagent la modélisation des connaissances ainsi que leurs fonctions et leurs rôles, nous allons maintenant nous intéresser à la façon dont le processus d'apprentissage de connaissances est envisagé dans la littérature.

Il existe une diversité de théories de l'apprentissage, dont certaines ont servi de guide dans la préparation des modèles d'enseignement, mais aucune théorie complète de l'apprentissage ou de l'instruction n'a encore vu le jour. On peut toutefois regrouper les théories de l'apprentissage comme les modèles d'enseignement sous certaines *philosophies* ou orientations de type cognitivistes, béhavioristes . . .

La classification selon des orientations théoriques facilite l'étude des théories d'apprentissage dans une perspective d'application à l'enseignement. L'étude de l'enseignement programmé est grandement facilitée, par exemple, lorsqu'elle est présentée dans la perspective des théories béhavioristes skinnériennes [Skinner 85], le modèle d'enseignement par découverte se clarifie par les théories cognitives de Piaget [Piaget 74] ou Bruner [Bruner 66] ou encore le concept des écoles libres [Montessori 94, Freinet 50a] prend un sens précis dans la perspective de la philosophie humaniste . . .

Certains aspects de l'apprentissage appliqués à l'éducation ne sont cependant pas facilement assimilables exclusivement à une orientation. Il en est ainsi pour l'étude de phénomènes psychologiques dans leurs relations avec l'apprentissage (l'intelligence, la motivation, le niveau socio-économique, le langage, etc). De même, certains auteurs peuvent ne pas être associés à une orientation précise. Par conséquent, plutôt que de choisir un développement de ces orientations auxquelles nous adjoindrions l'apport des auteurs "autres", au niveau de l'apprentissage des connaissances, nous avons choisi d'organiser notre exposé en portant notre attention sur les facteurs qui l'influencent et ceci quelles que soient les orientations théoriques. D'ailleurs, même si à première vue, ces positions sont incompatibles les unes avec les autres, elles ne sont toutefois pas exclusives. En effet, ces orientations, à notre sens, relèvent davantage d'une analyse d'un même phénomène, l'apprentissage, pour lequel les auteurs auraient choisi ou accentué un point de vue ou un niveau d'étude différent. Les tenants des différents courants étudient l'apprentissage soit en tant que processus en jeu pour modifier une structure interne de connaissances (les cognitivistes), soit en tant que résultat comportemental observable dans des interactions avec l'environnement (les béhavioristes), soit en tant que phénomène modifiant la relation du sujet avec le monde à un niveau social

ou affectif ... Pour notre part, nous considérons ces théories comme complémentaires et jugeons ainsi plus pertinent d'ordonner notre exposé selon l'intervention reconnue d'une multiplicité de facteurs et non en accordant un crédit à un point de vue plutôt qu'à un autre.

1.2 Théories ou facteurs d'apprentissage ?

1.2.1 Les facteurs d'apprentissage

Nous envisagerons successivement des facteurs dépendants ou internes au sujet tels que la motivation, les renforcements ou l'attention et, des facteurs externes (la notion de proximité des connaissances à acquérir et par conséquent une notion dépendant de l'écart entre les connaissances du sujet et celles à acquérir). Comme nous le verrons dans la seconde partie de ce manuscrit, notre travail s'inscrit davantage au travers de la prise en compte de ces différents facteurs plutôt que dans un courant théorique strict même si nous adhérons de manière privilégiée à une approche cognitive et plus spécifiquement aux travaux de Piaget.

Les facteurs internes ou la motivation

La définition de la "Motivation" sur laquelle nous nous appuyons ici est issue du Grand dictionnaire de Psychologie de Larousse [Bloch 94].

"La motivation : processus physiologiques et psychologiques responsables du déclenchement, de l'entretien et de la cessation d'un comportement ainsi que de la valeur appétitive ou aversive conférée aux éléments du milieu sur lesquels s'exerce ce comportement".

Ainsi, ce que nous définissons sous le concept de motivation recouvre des notions telles que l'attention, le renforcement et aussi la sélection de l'information. La motivation est un des concepts introduit en psychologie pour rendre compte du fait que, face à un environnement constant, un organisme ne répond pas toujours de la même façon. Ce concept doit rendre compte à la fois des facteurs qui déclenchent, maintiennent ou font cesser un comportement, mais aussi de ceux qui l'orientent.

L'orientation des comportements manifeste la valeur signifiante, ou valence, de certains éléments du milieu : la valence (positive ou négative) d'un stimulus, estimée d'après une norme innée ou construite par apprentissage ou éducation, entraîne, lorsque ce stimulus est détecté, la mise en œuvre de mécanismes physiologiques ou de conduites tendant à le rechercher ou à l'éviter. En retour, certaines valences peuvent se trouver modifiées par les conséquences du comportement. Par exemple, les évaluations et conseils donnés à un élève lors d'un apprentissage sont des facteurs motivants pouvant prendre des valences variées selon les contextes. Pour motiver un sujet en début d'acquisition de connaissances, il faut l'encourager et le renforcer positivement dès la détection d'un progrès³ ou du comportement recherché. Toutefois, si les encouragements ou approbations ne sont pas fournis avec modération ou à bon escient, c'est-à-dire lorsqu'il y a effectivement un progrès, ces derniers perdent peu à peu de leur efficacité dans le processus d'acquisition, ce qui se traduit par une modification de la valence du facteur (d'une valence positive, on arrive dans le meilleur des cas à une valence neutre).

De plus, il ne faut pas oublier le fait qu'un comportement ou une connaissance peut être renforcé involontairement et inconsciemment. En effet, si l'on ignore par exemple chez un enfant un effort pour améliorer la performance, il est possible que cela induise chez celui-ci un renforcement positif du comportement inverse ("ne pas faire d'effort" dans ce cas) ainsi qu'une diminution de la valence de l'effort.

3. La notion de progrès est définie ici comme l'évolution du comportement vers le comportement ou la connaissance à atteindre.

Il est à souligner également que l'effet motivant des encouragements, congratulations ou autres renforcements d'ordre social et émotionnel ont un impact différent dans l'acquisition et la manipulation de connaissances selon l'image que le sujet a de lui et même selon le niveau de connaissances du sujet dans le domaine cible [Abou-Jaoude 99]. En effet, des auteurs ont montré que des experts sont moins sensibles aux renforcements, qu'ils soient positifs ou négatifs et donc aux influences émotionnelles externes, que les débutants et les novices. La valence d'un stimulus est donc liée aux mécanismes par lesquels ses caractéristiques sont reçues, traitées et à ceux par lesquels une réponse est élaborée ; en d'autres termes, elle dépend des programmes d'analyse et d'action de l'organisme, programmes qui font partie de sa structure innée ou qui se sont construits par interactions et rétroactions successives entre les potentialités génétiques d'un individu et son environnement.

Si l'on revient maintenant à l'impact du facteur "motivation" lors d'un processus tel que l'apprentissage, il est évident et reconnu que ce facteur est non négligeable. Cependant, celui-ci doit être maîtrisé et utilisé à bon escient, c'est-à-dire en tenant compte d'une part des caractéristiques de la situation et d'autre part, des caractéristiques de l'élève. Par conséquent, afin de maximiser la valence de ce facteur, il faut adapter, en fonction de l'utilisateur et de l'environnement, les caractéristiques qui vont permettre l'obtention du comportement ou de la connaissance recherchée. Dans une situation classique d'apprentissage telle que l'enseignement primaire en classe par exemple, cette adaptation est difficile à mettre en œuvre dans la mesure où la prise en compte des caractéristiques individuelles des élèves donne lieu à des variables multiples, tant au niveau des degrés d'acquisition des connaissances ou prérequis qu'à celui des modes de traitement de l'information de chaque élève.

Nous mettons en œuvre cet aspect dans notre système. Cela est réalisé au travers de la délivrance d'une rétroaction reposant sur une évaluation qualitative des réponses du sujet comme nous le verrons dans la section 6.1 et dans le chapitre 8.

La motivation intervient au niveau de la rétention et du traitement des informations mais également au niveau de la perception du monde au sens large. Le besoin de recueillir des informations, qu'elles soient visuelles ou auditives, à propos de l'environnement se manifeste déjà chez le bébé. Cette activité d'analyse de l'environnement est évidemment cognitive dans le sens où l'enfant est capable de discriminer les informations nouvelles des informations anciennes, ce qui implique des processus de perception, d'apprentissage et de discrimination.

Chez l'adulte, le besoin de recueillir, de traiter et de trouver un sens ou une explication aux informations provenant de son environnement physique et social joue un rôle très actif. On qualifie de cognitives les motivations qui sont à l'origine des activités dans lesquelles le mécanisme de traitement de l'information a une place prépondérante. Les modèles généralement admis considèrent que l'influence de la motivation s'exerce au cours des activités perceptives au moyen d'un mécanisme de sélection attentionnelle à l'égard d'objets privilégiés de l'environnement en rendant plus disponibles certaines perceptions. Ainsi, cette pré-activation réalisée grâce à une augmentation de la motivation cognitive va permettre une diminution du temps de réaction mais, également, une augmentation du nombre des réponses fausses⁴. L'augmentation de cette motivation a une influence positive sur la performance au cours de l'acquisition d'un comportement nouveau, mais seulement jusqu'à une certaine valeur ; c'est ce que l'on appelle la loi de l'optimum [Yerkes 08]. Selon cette dernière, il existe une relation entre le degré de motivation et le niveau de performance qui s'exprime au travers des deux propositions suivantes (figure 1.1) :

- pour une tâche donnée, la relation est en *U inversé* et comporte un optimum de motivation ;
- pour un ensemble de tâches, l'optimum de motivation est en relation inverse du degré de difficulté de la tâche.

4. Cette augmentation des réponses fausses est probablement due au traitement des informations en fonction des organisations perceptives pré-activées qui ne sont pas forcément les plus adéquates pour toutes les situations

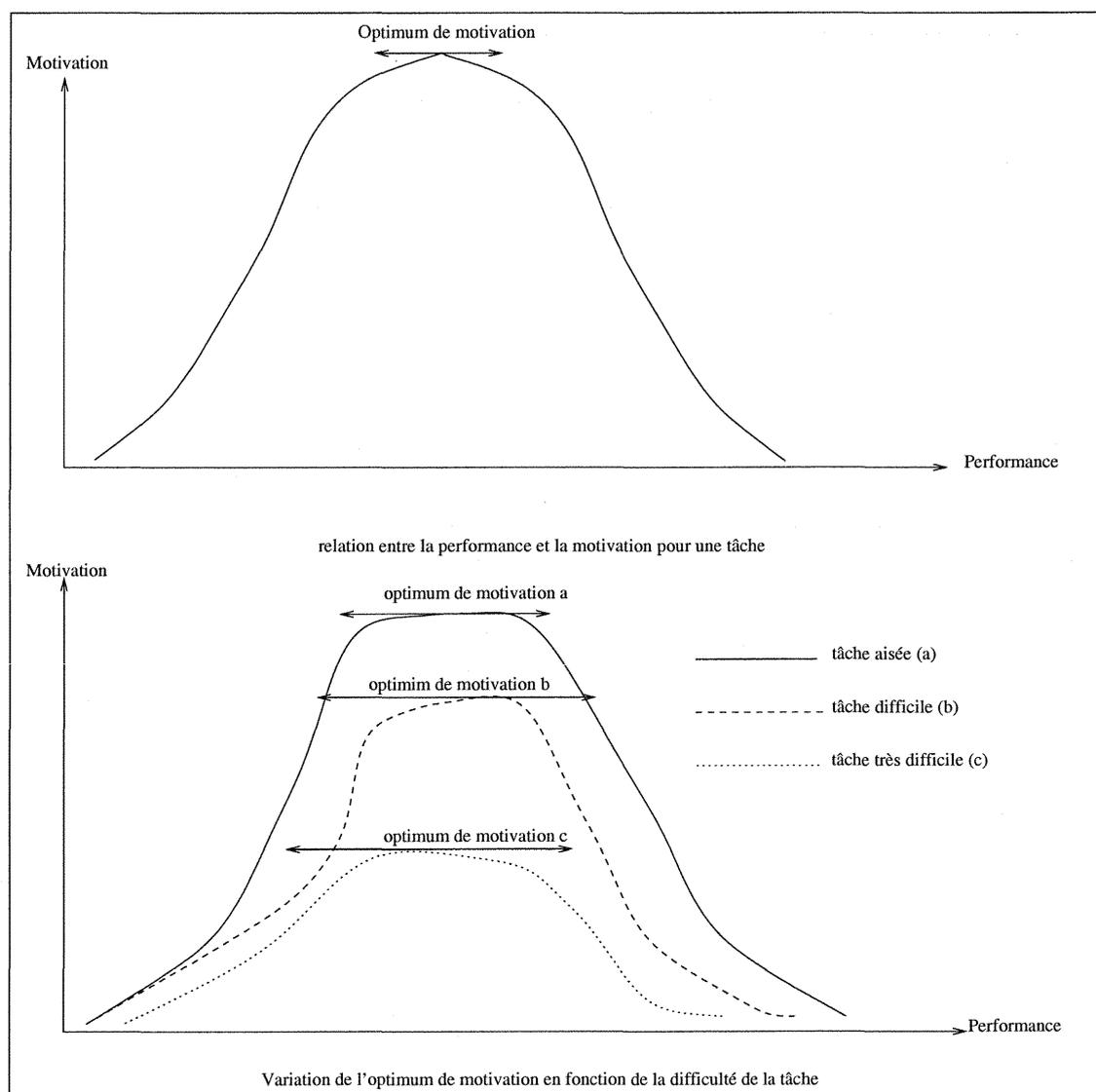


FIG. 1.1 – Relation entre motivation et degré de performance selon Yerkes et Dodson

Les données expérimentales montrent que les récompenses ont également un effet positif sur la réalisation de tâches simples : la possibilité de recevoir une récompense minimise les temps de réaction par exemple. En revanche, les incitateurs ont souvent un effet négatif lorsque les sujets doivent réaliser des tâches cognitivement complexes. Ainsi, l'obtention d'une récompense monétaire, par exemple, augmente la rigidité de la pensée lors de la résolution du problème, quand il s'agit de trouver une méthode de résolution différente de celle qui a été utilisée et récompensée antérieurement. Il est hautement probable que l'obtention de la récompense attire l'attention du sujet sur certaines caractéristiques de la tâche (celles qui sont en rapport avec la méthode renforcée) au détriment d'autres caractéristiques.

On considère aussi que la motivation permet aux individus d'ajuster leur comportement, lors de la réalisation de projets à l'aide d'évaluations, d'anticipations et de corrections de façon à s'approcher le plus possible du but désiré. Ainsi les informations apportées par la réalisation d'un comportement permettent de tester l'écart entre ce comportement et les projets poursuivis.

les facteurs externes ou la proximité des connaissances

L'acquisition d'une connaissance ne dépend pas uniquement de la motivation que le sujet déploie pour l'acquérir. Il faut également tenir compte des possibilités du sujet et, entre autres facteurs, de l'écart ou de la distance entre les connaissances acquises et celles restant à acquérir. Les connaissances nécessaires à l'acquisition d'un Savoir ou d'un Savoir-faire ne sont pas identifiables immédiatement par le seul bon sens, comme le montre l'exemple des échecs. On a pensé pendant longtemps que l'excellence à ce jeu était affaire de raisonnement et de profondeur de l'anticipation. Des études spécifiques ont montré qu'elle était principalement liée à la possibilité d'identifier rapidement un grand nombre de configurations de pièces et donc, était liée davantage à la différenciation de nombreuses catégories qu'aux caractéristiques du raisonnement [Lories 84], tout en n'excluant pas son intervention.

Acquérir une notion peut comporter des préalables relatifs à la connaissance d'autres notions du domaine, à la connaissance de certaines relations primitives ou à la maîtrise de certaines opérations, comme les inférences. Une difficulté supplémentaire est qu'une connaissance utilisée avec succès dans une situation peut ne pas l'être dans une situation voisine [Piaget 74, Bruner 90, Vygotsky 78, Papert 81]. Ce décalage dans la performance, dû à l'effet du contenu, peut être attribué soit à l'intervention de connaissances et de raisonnements différents dans les deux situations, soit à un effet différent de l'utilisation d'une même connaissance par le sujet [Leonard 84, Bastien 87].

Le premier cas conduit certains chercheurs à affirmer que la définition des connaissances doit stipuler les situations dans lesquelles on sait les utiliser. Cela pourrait suggérer que les changements survenus entre le début et la fin de l'apprentissage consistent uniquement en adjonction de connaissances du type "cette utilisation est optimale dans telle condition mais pas dans telle autre". De très nombreux résultats s'opposent à cette conception exclusivement cumulative de l'apprentissage. Le progrès peut également résider dans l'élimination d'une règle ou d'une hypothèse erronée, ou encore d'une contrainte inappropriée. Une autre forme de progrès consiste en la substitution d'une procédure à une autre dont la validité est limitée.

Pour le second cas, une même connaissance peut être appliquée à deux situations qui semblent très proches par un mécanisme d'analogie. Pour ce faire, il faut que le niveau d'abstraction soit suffisant pour être applicable à des situations proches mais différentes. Toutefois, la variation due à la différence entre les situations peut conduire à des écarts de performance malgré la mise en œuvre de la même connaissance.

Chaque connaissance, aussi simple soit-elle, nécessite des prérequis. Si le sujet ne dispose pas de ces prérequis, ou si l'écart entre les connaissances du sujet et celles à acquérir est important, l'acquisition est compromise. Comment comprendre et acquérir la notion d'osmose en biologie, par exemple, si l'on ne possède pas de connaissances sur les cellules, sur la chimie moléculaire...? L'apprentissage fait appel au concept de prérequis ou de stade de développement dans un contexte théorique plus large. Pour Piaget [Piaget 74], qui n'est pas le seul à proposer un développement cognitif au travers de stades [Wallon 86], les stades sont des étapes qui se suivent selon des règles strictes :

- l'ordre de succession de ces étapes est constant pour tous les enfants mais la chronologie peut être variable ;
- un stade est caractérisé par une structure d'ensemble ;
- les structures d'un stade deviennent parties intégrantes des structures du stade suivant ;
- dans tout stade, un niveau de préparation est suivi d'un niveau d'achèvement ;
- la préparation de certaines acquisitions se poursuit sur plus d'un stade. Des chevauchements peuvent donc survenir et il y a lieu de distinguer dans tout système de stades entre les processus de formation (genèse) et les formes d'équilibre finales (structures d'ensemble).

1.2. Théories ou facteurs d'apprentissage ?

Ainsi, les processus formateurs sont à voir comme des différenciations successives de ces structures. Dans cette optique, les états de connaissances ont des mécanismes relativement analogues à ceux des stades. Une manière de se représenter l'apprentissage est d'imaginer une sorte de réseau de connaissances dans lequel les nœuds représentent des concepts ou des connaissances et les arcs, les liaisons entre ces connaissances. Au début de l'acquisition, le réseau ne comprend que quelques nœuds et quelques arcs. Peu à peu, les arcs vont augmenter (les relations ou liaisons entre les connaissances) et d'autres nœuds peuvent émerger. Cette vision des connaissances est valide à l'intérieur d'un stade si l'on poursuit l'analogie. Maintenant, le passage d'un stade à un autre se fait par intégration de ce réseau dans un réseau plus global, plus précis ou encore à un autre niveau d'analyse. En fait, le passage d'un stade à un autre est essentiellement une modification qualitative des connaissances manipulées au stade précédent. Une connaissance apparemment acquise à un stade donné, peut, lors du passage au stade suivant, sembler oubliée ou non acquise ; en effet, le sujet peut ne plus savoir résoudre des problèmes précédemment réussis. Cette modification est temporaire au sens où, assez rapidement, le sujet résoudra à nouveau ces problèmes. Cette transition peut être expliquée par une restructuration qualitative des connaissances lors du passage à un stade supérieur. Ce passage ne peut se faire que lorsque le sujet a atteint un certain niveau (un certain nombre de nœuds minimaux et de relations entre les nœuds).

Les notions de prérequis ou de stade existent également au travers de différentes pratiques, que ce soit au niveau des programmes d'enseignement dans les écoles ou dans les méthodes d'enseignement. Les programmes scolaires français sont élaborés selon deux principes :

- certains enseignements ne peuvent être réalisés avant un certain âge, qui correspond à l'âge moyen où la majorité des enfants peuvent accéder à un type de connaissances comme les connaissances formelles ou certains niveaux d'abstraction ... ;
- un programme d'enseignement est vu comme une progression dans l'acquisition de connaissances dans laquelle une connaissance *A* doit être acquise avant une connaissance *B* parce que cette dernière nécessite la connaissance de la première.

Ce qui conduit ensuite à l'échec scolaire repose plus sur la difficulté de suivre un programme élaboré avec des enfants ou des élèves de niveaux différents (des prérequis pas nécessairement acquis) et des vitesses d'acquisition variables entre les enfants. Par conséquent, la grosse difficulté, à notre sens, de l'enseignement actuel est que, malgré les efforts des enseignants, il est difficile de vérifier systématiquement tous les prérequis nécessaires à une acquisition d'une part, et de remédier aux éventuels "oublis" d'autre part et ceci, pour chaque élève. Cette difficulté, voire impossibilité, creuse et accentue l'écart entre les connaissances réellement acquises par les élèves et celles qui auraient dû l'être. Par conséquent petit à petit, cet écart étant trop grand, l'élève n'est plus apte à acquérir les connaissances relatives au programme scolaire parce que celles-ci sont trop lointaines de son état de connaissances.

Au travers de la littérature, nous avons relevé deux méthodes prenant en compte cet écart ou tout au moins les possibilités de l'apprenant dans l'acquisition de nouvelles connaissances. Celles-ci seront réinvesties ultérieurement dans notre exposé. La première, relativement empirique, consiste en une adaptation des connaissances aux possibilités de l'apprenant. Quant à la seconde, l'adaptation se fait plutôt en modifiant l'aide (en enrichissant les interactions tuteur-apprenant) apportée à l'apprenant. Nous proposons ci-dessous de développer ces deux méthodes sur lesquelles une partie de nos propositions théoriques et applicatives reposent.

Une adaptation des connaissances. Le principe en est simple : lorsque l'on vise l'apprentissage d'une connaissance ou d'un système de connaissances relativement complexe, on peut simplifier cette connaissance afin de se rapprocher de l'état de connaissances du sujet. Selon cette conception, la seule façon de simplifier une tâche pour un apprenant consiste à la découper en plus petites unités manipulables. Cette méthode est utilisée, par exemple, dans la vulgarisation scientifique. Il faut toutefois prendre des pré-

cautions avec l'adaptation des connaissances ; les simplifications de connaissances ou les suppressions de relations entre certains concepts donnent souvent lieu à des conceptions erronées. Le but ici est de permettre à l'apprenant d'acquérir des connaissances potentiellement difficiles mais justes.

Adaptation de l'aide ou étayage [Vygotsky 78].

La notion de stade est sous-jacente dans les principes présentés par Vygotsky. Quant à l'étayage, il s'apparente en quelque sorte à l'apprentissage de proche en proche. L'apprentissage est progressif mais complet au sens où il repose sur les connaissances correctes qui viennent de faire l'objet de l'acquisition précédente. Ce qui va être adapté à l'élève concerne l'aide que le tuteur apporte et non la connaissance elle-même.

Par conséquent, l'objectif est de définir le niveau de développement de l'apprenant et de fixer la zone de développement prochain (ZDP). La ZDP est la zone dans laquelle l'apprenant peut résoudre avec de l'aide un problème qu'il n'aurait pu résoudre seul. L'intervention qui se réalise dans cette zone porte le nom d'étayage (*scaffolding*) ; il s'agit d'un type d'aide qui s'ajuste aux besoins de l'apprenant et qui est retiré graduellement. Le concept d'étayage se situe à l'opposé de la conception précédente en ce sens qu'il s'appuie sur l'idée que l'apprenant doit plutôt recevoir, au point de départ, un soutien important pour réaliser une tâche entière et fonctionnelle, ce soutien diminuant avec le développement de ses habiletés [Brown 95]. Cette méthode est utilisée par exemple lors de l'intervention auprès des élèves en difficulté de lecture au Québec [Giasson 97].

Une manifestation relativement proche de ce que présente Vygotsky [Vygotsky 78] est observée dans l'acquisition du langage chez l'enfant [Rondal 83]. En effet, Rondal [Rondal 83] observe et rapporte que l'adulte, et en particulier la mère, modifie, même si cela n'est pas volontaire, certains paramètres du langage tels que l'accentuation, la durée articulatoire, le rythme d'élocution, le nombre des pauses mais aussi les modifications tonales lorsqu'il interagit avec le jeune enfant. Ces modifications ont pour objectifs de permettre une communication langagière entre l'enfant et l'adulte. Elles conduisent en outre à attirer l'attention du jeune enfant sur certaines caractéristiques particulières (saillance sémantique ou difficulté articulatoire par exemple) et à apporter ainsi une aide importante à l'acquisition d'un système aussi complexe que le langage. On observe que ces aménagements langagiers de l'adulte qui sont en fait des automatismes, s'amenuisent progressivement avec l'âge et le développement langagier de l'enfant. Même si cette dernière illustration n'est pas le fruit d'une technique d'enseignement volontaire de la part du et des tuteurs (ici, les adultes et surtout la mère), cette pratique n'en est toutefois pas inintéressante dans le cadre qui nous concerne tant sur le plan de la technique éducative que sur celui du domaine d'application. Ainsi, ces idées et concepts apparaissent dans la seconde partie de ce manuscrit.

Après avoir donné un panorama des conceptions portant sur l'acquisition des connaissances, nous allons nous pencher dans la section suivante sur les travaux déjà réalisés avec un apprentissage par ordinateur des connaissances à acquérir.

1.3 Les connaissances à acquérir au travers des environnements informatiques

Le recours à l'utilisation de logiciels informatiques d'apprentissage peut avoir des causes multiples :

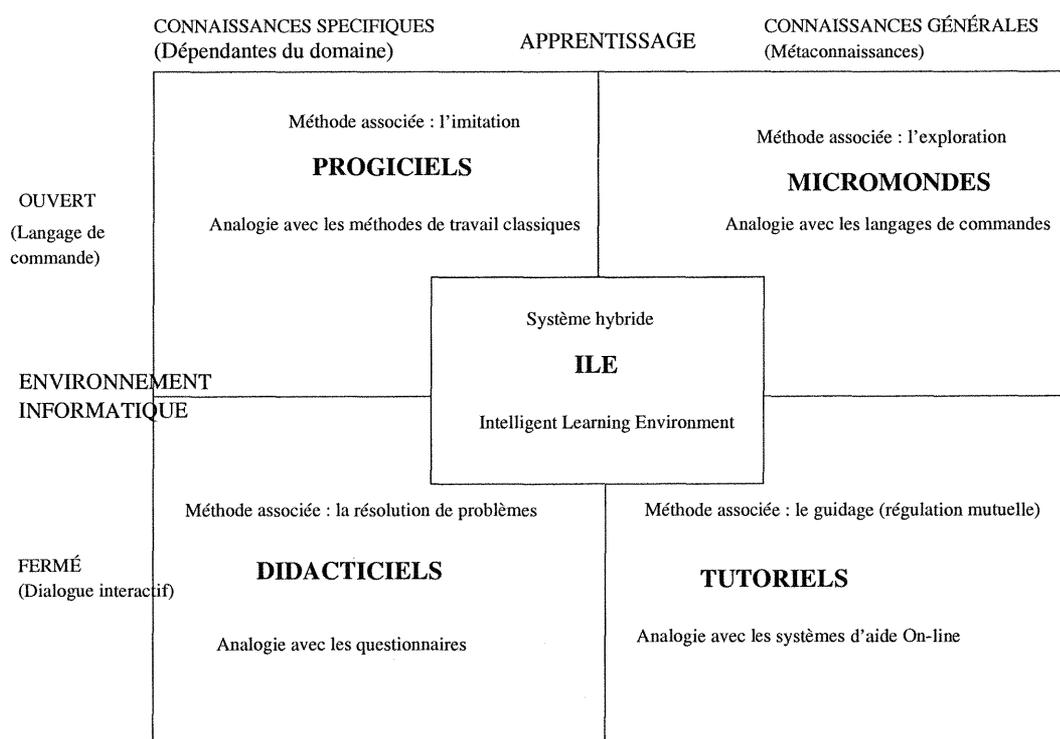
- un aspect attrayant dans l'utilisation ou la découverte de connaissances ;
- une aide à la manipulation directe ou à la visualisation dans certains domaines (géométrie, par exemple) ;
- un entraînement à certaines tâches répétitives ;

- un contrôle automatique de certaines tâches qui permettent un allègement ponctuel du travail de l'enseignant qui peut ainsi se focaliser sur des difficultés plus spécifiques ou individuelles ;
- une volonté d'individualiser certaines interactions système-apprenant.

Cette liste non exhaustive des raisons d'utilisation de l'informatique permet de justifier, au moins partiellement, l'existence d'environnements d'apprentissage variés.

1.3.1 Les environnements d'apprentissage

Il est possible de répertorier des systèmes informatiques d'apprentissage variés dans leurs formes, leurs objectifs, leurs domaines d'applications et leurs moyens d'intervention sur l'activité de l'utilisateur. Dans la littérature, ces systèmes sont répertoriés selon deux variables qui sont le type d'environnement informatique et les apprentissages. Cette classification est synthétisée sur la figure 1.2 extraite de Mendelsohn [Mendelsohn 95].



extrait de P.Mendelsohn

FIG. 1.2 – Taxonomie schématique des environnements d'apprentissage d'après P. Mendelsohn [Mendelsohn 95]

Les progiciels et micromondes

Les progiciels et les micromondes sont des programmes conçus pour être utilisés indistinctement par plusieurs utilisateurs, sans contrôle de leur activité. Ils présentent la particularité pour un système d'apprentissage de ne pas avoir d'objectif interne aux systèmes ou de problèmes à résoudre par l'élève. Ces systèmes permettent d'explorer un domaine ou de tester une conjecture sans chercher à résoudre un

problème particulier. Par conséquent, l'idée d'erreur est peu présente dans de tels systèmes puisque ceux-ci réagissent aux actions de l'utilisateur, ne prennent pas d'initiative et n'émettent aucun jugement sur les actions. Ce qui distingue ces deux types de systèmes repose sur les connaissances ; dans les progiciels, les connaissances sont spécifiques alors que dans les micromondes, les connaissances manipulées sont plus générales ; elles sont pour ainsi dire des métaconnaissances.

De manière concrète, ces systèmes proposent ainsi une découverte libre en offrant à l'utilisateur la possibilité d'utiliser des outils pour construire des modèles mentaux. Pour illustrer nos propos, nous allons prendre l'exemple de CABRI [Laborde 95] (CAhier de BRouillon Interactif) qui peut être vu à la fois comme un progiciel et un micromonde selon le point de vue adopté.

En effet, lorsque la tâche de l'utilisateur est de "jouer" avec CABRI, le logiciel est alors un micromonde, c'est-à-dire un environnement d'apprentissage ouvert dans lequel le sujet ne suit aucun scénario préalablement établi. L'utilisateur dispose d'une sorte de boîte à outils qui lui permet de manipuler, de créer et d'essayer différentes choses sur les objets. L'acquisition qu'il réalise est alors de nature générale et peut être de l'ordre de la planification ou de la coordination de sous-buts dans la construction d'une figure, ou encore de l'abstraction d'un invariant à partir de plusieurs occurrences d'un phénomène. Les systèmes LOGO [Papert 81] ou CHYPRE [Bernat 96] sont également des micromondes.

Maintenant, si l'on veut utiliser CABRI comme un système de représentation pour transmettre un concept de géométrie précis tel que la construction d'une parallèle, CABRI peut entrer dans la catégorie des progiciels. Les compétences spécifiques sont appelées des expertises. Ces dernières sont propres à la géométrie : par exemple la construction d'une droite perpendiculaire à un segment, d'un cercle circonscrit, ou encore d'un lieu géométrique.

Les didacticiels et les tutoriels

Tout comme les micromondes et les progiciels, les didacticiels et les tutoriels se distinguent par la dimension des connaissances ; les tutoriels portent sur des connaissances de haut niveau, abstraites et générales alors que les didacticiels sont propres à un domaine de connaissances et portent sur des connaissances spécifiques. Dans la mesure où cette opposition de dimension a été précédemment illustrée, dans la distinction progiciels-micromondes, nous ne la développons pas à nouveau.

Ce qui lie ces deux types de systèmes sont, à des degrés divers selon les logiciels considérés, les contrôles de l'apprentissage, des connaissances. En effet, le système s'octroie le droit d'interrompre l'élève s'il le juge important pour la formation, et décide du moment où l'objectif fixé est atteint par l'utilisateur. Un objectif pédagogique existe plus ou moins explicitement et est interne au système. Pour délivrer des explications ou une intervention quelconque, le tuteur emploie des connaissances explicites sous forme déclarative. De plus, dans la mesure où le tuteur ou le didacticiel est un système actif grâce à ses éventuelles interventions au cours des sessions, il porte un jugement sur les actions de l'utilisateur et peut refuser une assertion après l'avoir analysée et qualifiée d'incorrecte. La notion d'erreur est importante dans ce contexte. Mais plus que l'erreur qui est toujours à définir en fonction d'un objectif donné, il s'agit ici d'un écart par rapport aux réponses attendues. Une réponse correcte pourra être rejetée si elle n'est pas accessible au tuteur. Pour évaluer les actions d'un élève et tenir compte de cette évaluation, un tuteur doit posséder en plus des connaissances sur le domaine, des connaissances sur l'élève et des connaissances pédagogiques.

Pour illustrer ces systèmes, nous proposons un tuteur issu du modèle ACT* de Anderson : LISP TUTOR [Anderson 85a]. Ce logiciel a comme particularité de reposer sur des fondements théoriques particuliers et se veut psychologiquement fiable. Dans ce système, on propose des leçons qui sont des cours magistraux présentant différentes notions. Suite à ces leçons, le logiciel propose plusieurs problèmes qui ont pour objectif d'évaluer les connaissances de l'apprenant. Un problème consiste à compléter les

paramètres d'une déclaration de fonction LISP. Pour résoudre ces problèmes, un tuteur très directif est attaché au système. Celui-ci signale les fautes à l'élève, en détermine le type et propose des précisions sur la réponse correcte. Dans des versions postérieures, deux autres formes d'encadrement ou de *feedback* ont vu le jour : pas de tuteur ou un tuteur ne fournissant de l'aide qu'à la demande.

D'autres systèmes tel que WEST [Burton 82], SCHOLAR [Carbonell 70], WUSOR III [Goldstein 82b] sont également à catégoriser dans les tuteurs. Néanmoins, les formes qu'ils revêtent sont assez variées. Dans LISP TUTOR, la présentation des connaissances est conventionnelle et magistrale, tandis que dans WUSOR III ou WEST, l'apprentissage se fait plutôt sous une forme ludique ; dans le cas de WEST qui est un tuteur ayant pour objectif d'entraîner et d'améliorer les compétences arithmétiques de l'utilisateur, l'élève se bat contre l'ordinateur pour gagner la conquête de l'ouest au travers d'un jeu de l'oie. L'élève est invité à manipuler des expressions arithmétiques pour élaborer la meilleure stratégie et donc pour gagner⁵.

Les environnements d'apprentissage intelligents ou ILE

Ces environnements d'apprentissage intelligents ou ILE (*Intelligent Learning Environment*) sont des systèmes hybrides, c'est-à-dire qu'ils sont à cheval sur au moins deux catégories en même temps. On les qualifie d'"intelligent", ce qui à notre sens est quelque peu abusif, dans la mesure où ils combinent différentes techniques en fonction des cadres d'utilisation, des objectifs pédagogiques, du type d'interaction mise en œuvre, ... CABRI-Géomètre dont nous avons évoqué quelques caractéristiques précédemment en est un bel exemple ; il présente un certain nombre de caractéristiques qui sont liées à un système mélangeant les différents genres tel que progiciel, micromonde mais également tutoriel si l'on considère le système d'aide de CABRI.

1.3.2 Organisation des connaissances : le module de l'expert

Comme nous avons pu le voir, dans la section 1.3.1, il existe diverses formes d'environnements qui, par ailleurs, peuvent prendre différentes formes (ludique, magistrale ...). Par conséquent, les formes des connaissances manipulées par le système, quel qu'il soit, peuvent être assez variées. Toutes ces connaissances à acquérir sont regroupées dans un seul module qui constitue un modèle de la connaissance de référence : le modèle de l'expert. Celui-ci doit permettre au système de se comporter comme le ferait un expert. Il contient par conséquent des connaissances conceptuelles, comme dans SCHOLAR, mais aussi des procédures de résolution de problèmes. Plusieurs systèmes, dont le célèbre GUIDON [Clancey 79] ont, en toute logique, été construits à partir de systèmes experts préexistants. Ces premières tentatives ont montré des limites : les explications fournies par un système à règles (en général, la trace des règles qu'il a utilisé) ne sont pas suffisantes dans le contexte éducatif. Ce constat est à l'origine d'une évolution des modèles de l'expert (et de certains systèmes-experts) d'une part vers des modes de raisonnement plus proches de ceux qu'utilisent les experts humains et, d'autre part vers une représentation explicite des stratégies de résolution de problème (auparavant implicitement distribuées parmi les règles et leur prise en compte par le moteur d'inférence). Grâce à ces stratégies, le tutoriel peut avantageusement modifier le raisonnement de l'expert, pour le contraindre par exemple, à ne pas utiliser des concepts complètement étrangers à l'élève (sinon ce dernier ne pourrait comprendre ni les résultats ni les explications de l'expert). Une autre difficulté résulte du fait que l'élève adopte parfois un point de vue qui diffère radicalement de celui de l'expert. Les solutions envisagées dans les développements récents convergent vers la nécessité de doter l'expert de multiples points de vue sur son domaine. Dans certains systèmes, ces points de vue n'ont pas la même validité et il devient intéressant de les considérer comme des étapes

5. La meilleure stratégie ici n'est pas forcément de faire le maximum de points.

au sein d'une progression pédagogique. L'apprentissage apparaît alors d'avantage comme une succession de re-conceptualisations (globales ou partielles) du domaine. Ce choix conceptuel est illustré par exemple dans le tutoriel QUEST [White 87]. Ce dernier prévoit la progression de l'apprenant à travers trois modèles de fonctionnement d'un circuit électrique. Il commence par apprendre à raisonner sur un modèle qualitatif (présence ou absence de courant dans le circuit) ; en second lieu l'élève est confronté à un modèle semi-quantitatif (augmentation ou diminution de l'intensité) et, en dernier lieu seulement, le modèle quantitatif est abordé (loi d'Ohm, etc.).

Chaque système est conçu pour une population cible qui peut être plus ou moins large. Par conséquent, la connaissance manipulée par le système doit être suffisante pour résoudre tous les problèmes présentés par le système tuteur mais également pour représenter l'intégralité des connaissances manipulées par les utilisateurs. A défaut, le système ne pourra apporter la moindre aide à l'utilisateur dans la mesure où il ne dispose pas des moyens qui lui permettent de qualifier la réponse et donc de fournir une aide adaptée.

L'artefact de cette situation est que dans un certain nombre de cas, le modèle de l'expert est très, voire trop, complexe et donc inutilisable directement par le système pour proposer une éventuelle aide, au sens d'une explication adaptée aux compétences de l'utilisateur. Pour combler cet effet pervers des connaissances de référence, certains concepteurs optent pour l'utilisation d'un modèle de l'élève idéal comme modèle des connaissances de référence [Anderson 90]. Celui-ci est une version simplifiée de la connaissance experte que l'élève est censé pouvoir maîtriser [Wenger 87]. Néanmoins, cet élève idéal qui remplace l'expert est toujours un modèle pour un groupe d'utilisateurs, et non pour un sujet particulier ayant un niveau de compétences ou de connaissances.

Dans certains systèmes, une évolution dynamique du contenu de ce module est parfois permise. En effet, une connaissance manipulée par l'élève peut être estimée par le système plus aisée à acquérir que la connaissance initialement proposée par le système et sera ajoutée aux connaissances du modèle de l'expert par le système [Self 87, Murray 91]. On peut observer ce type de mécanisme dans le tuteur INTEGRATION [Wenger 87] par exemple.

Après avoir délimité le domaine de connaissances que le système exploite, il faut représenter ce domaine afin qu'il réponde aux fonctionnalités du système. Les environnements d'apprentissage sont imaginés pour remplir des tâches variées qui vont de la découverte ou de la visualisation d'un phénomène à son explication. Pour atteindre le but fixé au tutoriel, les connaissances sont représentées dans le module de l'expert sous la forme de :

- connaissances compilées lorsque le système ne doit pas fournir d'explication à l'utilisateur, ainsi que lorsque le système a une fonction de solveur comme dans MENTONIEZH : le système propose une ou plusieurs solutions correctes au problème soumis. Dans ce cas, il a besoin de connaissances sur le domaine qui lui permettent de jouer le rôle d'un expert. Ces connaissances doivent être compilées afin de maximiser la vitesse de résolution ;
- connaissances explicites, déclaratives, qui permettent de proposer à l'utilisateur une rétroaction adaptée ou tout au moins une explication des connaissances manipulées.

Ces deux types de connaissances peuvent cohabiter dans un même système pour répondre à de nombreux besoins et ceci, à des moments différents. A partir de l'exploitation du module de l'expert, le système peut, selon les fonctions intégrées, générer des problèmes, comparer les réponses de l'élève avec les connaissances de référence ... [Polson 88].

Le module de l'expert est relativement complexe au niveau de la conception mais aussi au niveau représentationnel de ce domaine. Progressivement, une tendance à multiplier les points de vue dans

les modèles de l'expert avec, par exemple, les modèles qualitatifs rencontrés dans QUEST [White 85] émerge ; cette pluralité d'approches d'un domaine a pour principal objectif de rendre les connaissances "appréhendables" par les utilisateurs. Au travers de cette volonté, les systèmes tendent vers la nécessaire adaptation des connaissances évoquée dans la section 1.2.1. Cependant, l'adaptation n'est que partielle puisqu'elle est réalisée de manière théorique (adaptation selon trois modèles de fonctionnement de circuits électriques dans QUEST) ou pour des groupes cibles au travers de l'idée de l'élève idéal. Un pas important reste à franchir : celui de l'adaptation des connaissances de référence ou de l'aide fournie à un utilisateur à un moment donné du processus d'apprentissage.

Quant à la modélisation des connaissances à acquérir, toutes ou presque toutes les techniques disponibles en IA ont été mises en œuvre dans l'élaboration du modèle de l'expert. On retrouve dans les systèmes une pluralité dans la forme des connaissances manipulées tels des Savoir, des Savoir-faire.

Nous allons, dans la section suivante, nous pencher sur leur modélisation.

1.3.3 La modélisation des connaissances à acquérir

L'utilisation et la modélisation des Savoirs

Pour modéliser des connaissances conceptuelles et les relations entre celles-ci, les concepteurs de tutoriels ont utilisé classiquement les réseaux sémantiques. Par exemple, Carbonell, pour représenter un enseignement de géographie de l'Amérique du sud, a utilisé dans SCHOLAR [Carbonell 70, Nicaud 88, Kass 87] un réseau sémantique dont les noeuds sont des objets géographiques et des concepts. Nous illustrons cet exemple au travers de la figure 1.3. Du fait de l'organisation hiérarchique de ces objets par des relations du type "superpart", "superconcept" ou "superattribut", des inférences simples peuvent être réalisées par propagation. Les limitations inhérentes à ce mode de représentation sont bien entendu liées au fait qu'il n'est pas possible de représenter des connaissances procédurales sur un tel mode et au caractère *ad hoc* de ce type de représentation. Deux lecteurs d'un même réseau peuvent l'interpréter différemment, et d'après Kass [Kass 87], ce point constitue la principale cause de leur abandon.

L'utilisation et la modélisation des Savoir-faire

Pour construire des représentations modulaires de compétences avec une organisation en catégories indépendantes des processus qui permet de réaliser des calculs sur cette connaissance, les concepteurs ont généralement recours à des systèmes à règles de production. Une des contributions majeures de Clancey [Clancey 83, Clancey 79] avec le programme GUIDON est d'avoir proposé une méthodologie pour ce type de modèle dont on peut résumer les étapes essentielles de la manière suivante :

1. analyse du domaine de référence à partir de protocoles d'experts et de novices ;
2. construction d'un modèle de l'expert qui tienne compte de toutes les nuances possibles de raisonnement ;
3. construction du module d'enseignement.

L'objectif de GUIDON est d'aider les étudiants en médecine à émettre un diagnostic médical. Pour ce faire, le système repose sur un système expert, MYCIN [Shortliffe 76]. Ce dernier, connu pour être le premier système expert de diagnostic ainsi que pour sa séparation base de connaissance-moteur d'inférence, possède un ensemble de règles de production auquel des coefficients de certitude sont associés. Une règle de production dans MYCIN se présente sous la forme d'une combinaison de prémisses logiques dans la partie condition de la règle qui conduit à un diagnostic en conclusion. Cela est illustré sur la figure 1.4.

GUIDON sélectionne un cas de maladie infectieuse, décrit le cas à l'élève qui doit alors diagnostiquer la maladie. Pour ce faire, l'élève a la possibilité de poser des questions au système et de lui soumettre ses

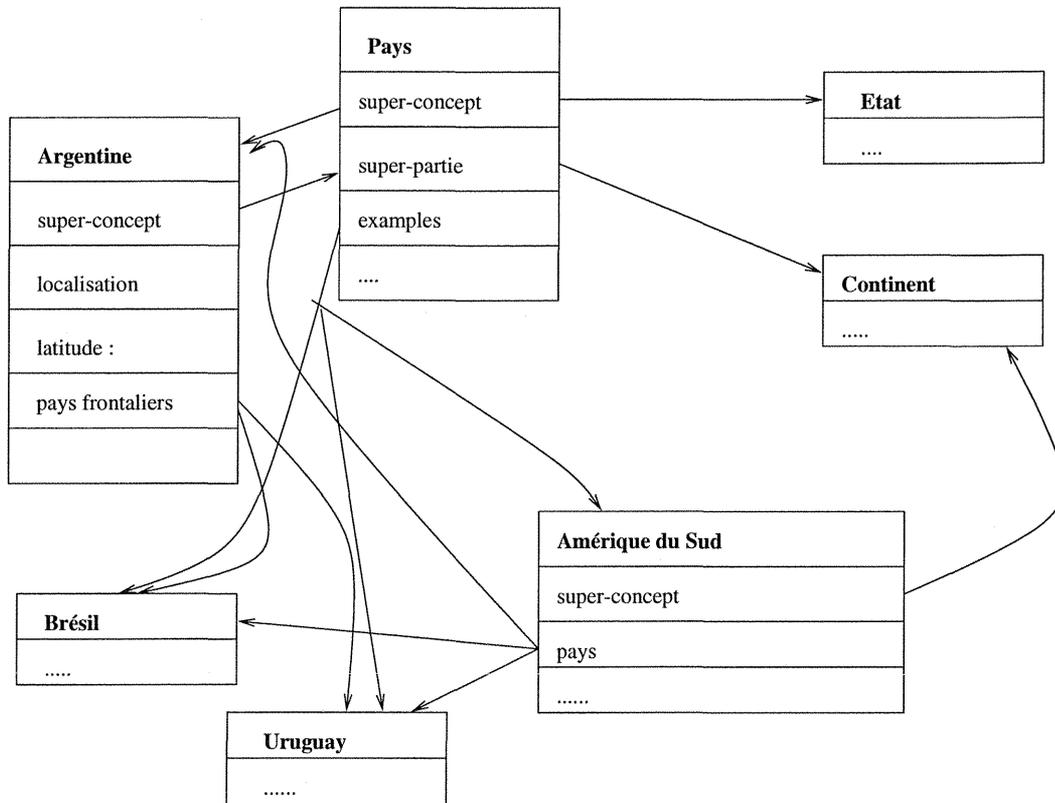


FIG. 1.3 – Extrait du réseau sémantique de SCHOLAR issu de Wenger [Wenger 87]

hypothèses.

Lorsque le concepteur veut représenter des connaissances expertes mais également des informations pédagogiques, il peut avoir recours à un formalisme issu des réseaux sémantiques que nous avons décrit précédemment : les graphes génétiques. Ceux-ci sont des réseaux sémantiques dont on a exploité la topologie du graphe et dans lesquels les connexions représentent le processus de genèse de la connaissance au sens de Piaget [Wenger 87]. En effet, certaines connaissances conceptuelles sont fortement inter-connectées et il apparaît intéressant dans un système d'apprentissage de transmettre également cette liaison entre les connaissances. Les inter-connexions constituent elles-mêmes des connaissances. Ces connexions peuvent ainsi émerger du graphe génétique et former des unités d'apprentissage dans une session [Kass 87]. Le système WUSOR III [Goldstein 82b] utilise cette technique au niveau de la modélisation des connaissances expertes. L'objectif de ce tutoriel est l'enseignement des raisonnements logiques et probabilistes, ainsi que les relations entre ces connaissances. Ceci est réalisé au travers du jeu WUMPUS dans lequel le joueur doit se déplacer dans un labyrinthe inconnu où se trouvent plusieurs grottes. L'objectif est de tuer le "wumpus" tout en évitant différents pièges (chauve-souris, puits). Une connaissance est représentée à l'aide de règles de production qui constituent les noeuds du graphe. Quatre types de liens ou d'arcs sont définis : généralisation-spécialisation, analogie, affinement-simplification, et finalement déviation-correction. Ceux-ci représentent les stratégies d'apprentissage.

D'autres formalismes tels la représentation des connaissances basée sur les logiques peuvent être utilisés de manière tout à fait satisfaisante. En effet, certains systèmes tels que le tuteur FITS [Ikeda 93]

IF (1) the gram stain of the organism is gram negative, and (2) the morphology of the organism is rod, and (3) the aerobicity of the organism is anaerobic,
THEN there is suggestive evidence (0.6) that the genus of the organism is Bacteroides.

FIG. 1.4 – Exemple de règle de production dans MYCIN

(extrait de *Tutoring rules for guiding a case method dialogue* [Clancey 79])

ou INTEGRATION [Wenger 87], que nous présentons dans le paragraphe suivant, mais aussi de nombreux autres sont des systèmes basés sur une représentation de type logique qui peut être classique, multivaluée, modale, floue

Une base de connaissances est constituée exclusivement d'un ensemble de formules décrivant l'univers du discours. A celles-ci sont associées des valeurs de vérité. Les formalismes logiques ont pour principal intérêt une puissance ainsi qu'une clarté d'expression très séduisante. Effectivement, ce qui favorise fréquemment le choix de ce mode de représentation est la clarté du formalisme qui résulte d'une syntaxe et d'une sémantique définies et claires [Besnard 89], et ceci, contrairement à d'autres techniques de représentation de connaissances comme les réseaux sémantiques. Cette clarté du formalisme permet à différents lecteurs d'une même formule de lui attribuer une sémantique unique. Quant à la puissance du formalisme, deux aspects peuvent être distingués : une puissance au niveau de la couverture du monde décrit et au niveau du raisonnement.

Pourtant, quelques bémols sont à mettre sur ce type de techniques représentationnelles. En effet, malgré leur grande puissance d'expression, elles n'autorisent pas une représentation d'aussi haut niveau que les réseaux sémantiques par exemple et ne modélisent pas la structuration des connaissances. Ajoutons à cela, la difficulté qu'il y a à valider le contenu d'un ensemble de connaissances exprimé sous la forme d'une succession de formules logiques. Le choix d'un des formalismes logiques est conditionné par les propriétés sur lesquelles le concepteur du tuteur interactif veut asseoir son système. La divergence des propriétés explique la variété des potentialités des formalismes logiques dans les systèmes actuels. Ci-dessous, nous présentons deux systèmes qui sont FITS [Ikeda 93] et INTEGRATION [Wenger 87], ainsi que les spécificités de chacun de leur formalisme. Ceux-ci ont une modélisation de la connaissance de référence au travers respectivement de la logique classique et de la logique probabiliste.

Les connaissances expertes dans le système de Mizogushi et Ikeda [Ikeda 93] sont découpées en un ensemble de propositions issues de la logique classique qui couvrent le domaine de connaissances expertes. Ces propositions représentent un état à atteindre. La modélisation d'une base de connaissance cible grâce à ce type de formalisme est efficace au niveau de la couverture du monde décrit.

Le système INTEGRATION [Wenger 87], quant à lui, utilise un formalisme basé sur la logique probabiliste. L'objectif, ici, est de modéliser à la fois des connaissances déclaratives et procédurales. Nous proposons de développer davantage le système et les particularités du formalisme dans le paragraphe suivant qui se rapporte à la modélisation conjointe de ces deux types de connaissances.

Utilisation et modélisation de la combinaison des Savoir et des Savoir-faire

Lorsque les connaissances manipulées relèvent à la fois de connaissances déclaratives et procédurales, de Savoirs et Savoir-faire, les concepteurs de tutoriels utilisent généralement des schémas. Ces derniers sont des structures de données largement utilisés en raison des facilités de programmation permises par les langages de programmation orientés objets.

Le tuteur INTEGRATION [Wenger 87] concerne les connaissances relatives à l'intégration de fonctions mathématiques. La connaissance de l'expert est représentée sous la forme d'un ensemble exhaustif d'associations entre les classes de problèmes et les méthodes de résolution. A chaque correspondance est associée la probabilité qu'un expert utilise la méthode pour résoudre la classe de problèmes. Ceci est illustré sur la figure 1.5.

| Méthodes de résolution | CLASSES DE PROBLÈMES | | |
|-------------------------|----------------------|-----------|------|
| | <classe1> | <classe2> | ... |
| Intégration par parties | <proba1> | <proba2> | |
| . | . | . | . |
| . | . | . | . |
| . | . | . | . |

FIG. 1.5 – Schéma des représentations de connaissances expertes à l'aide de la logique probabiliste

La logique probabiliste est un formalisme qui possède un pouvoir d'expression des connaissances beaucoup plus large que la logique classique ou multivaluée au sens où les probabilités associées à une formule peuvent s'échelonner sur l'ensemble des réels compris entre 0 et 1. Le réel obtenu, c'est-à-dire la valeur de vérité de la formule, représente la probabilité que la formule soit vraie. La valeur de vérité d'une formule est donc la probabilité qu'un expert, face à un problème particulier appartenant à une classe déterminée, propose une solution particulière. La valeur de vérité est faible, proche de 0, lorsqu'il n'existe pas ou peu de chance que l'expert propose cette solution. La valeur de vérité est élevée, proche de 1, dans le cas contraire.

Par le biais de l'explication des valeurs de vérité, on appréhende le principal inconvénient de ce formalisme. En effet, la logique probabiliste ne permet pas de représenter l'ignorance qui se traduirait dans INTEGRATION [Wenger 87] par le fait que l'on ne connaît pas, face à un problème donné, la solution que l'expert donnerait. De plus, on n'établit pas au travers de ces probabilités le caractère incorrect d'une proposition, d'une association. En effet, ce n'est pas une valeur de vérité nulle qui induit la qualité incorrecte de la solution. Une valeur de vérité permet juste d'affirmer que l'expert choisit une autre proposition plus adéquate à la situation.

Une autre difficulté moins théorique cette fois est la difficulté de faire évoluer une base de connaissances reposant sur ce formalisme [Haton 91]. Par conséquent, la somme des probabilités, des valeurs de vérité, doit être égale à 1. D'où le fait que toute nouvelle assertion conduit à une révision de la répartition des probabilités attribuées aux autres assertions de la base de connaissances.

Tous les modes de représentation que nous avons évoqués jusqu'à présent, sont bien sûr interchangeables et il arrive bien souvent que les concepteurs associent plusieurs modes de représentation dans un même système pour bénéficier des avantages de chacun. En effet, comme nous l'illustrons sur la figure 1.6 au travers d'un second exemple de MYCIN, deux techniques peuvent être combinées pour augmenter la puissance de représentation des connaissances.

Ici, on fait cohabiter des règles de production dans lesquelles les propositions sont des probabilités conditionnelles. Cela se traduit par : si $P(H/E)$ la probabilité d'un diagnostic H, compte tenu d'un en-

si $P(H / E) > P(H)$
alors augmentation de $P(H)$

FIG. 1.6 – *Second exemple de règles de production dans MYCIN*

semble de symptômes E , est supérieur à $P(H)$ la probabilité *a priori* d'un diagnostic H sans référence à aucune observation, alors la présence d'un symptôme E accroît la probabilité du diagnostic H . Associé à cette règle de production est attaché un degré d'incertitude (par exemple, 0.6 dans la figure 1.4) que l'on obtient à partir de deux facteurs qui sont appelés mesure de croyance (belief) ou MB et une mesure de non-croyance (disbelief) ou MD . Ceux-ci sont définis séparément en supposant une relation linéaire sur les deux parties de l'échelle $[0, P(H)]$ et $[P(H), 1]$ avec la quantité $P(H)$ différente de 0 et de 1. Le degré de certitude est alors obtenu tout simplement en soustrayant MD à MB . Il varie entre -1 et 1 . Positif, ce coefficient va dans le sens de la confiance en la règle ; négatif, il va dans celui de la défiance.

Notons toutefois le caractère empirique des facteurs de certitude ainsi introduits dans les systèmes apparentés à MYCIN. Malgré cela, la technique est souvent satisfaisante.

Le dernier point que nous soulignons est que les connaissances à acquérir dans les systèmes informatiques, à notre connaissance, sont toujours des connaissances précises, au sens où l'on connaît la cible à atteindre, les règles de fonctionnement Cela s'explique en partie par les domaines traités par les systèmes. Ceux-ci portent sur l'arithmétique, la géométrie, l'apprentissage des langues étrangères, l'électricité, la géographie

Ces matières, enseignées dans les milieux scolaires, prodiguent des connaissances, procédurales ou déclaratives, précises et non discutables. Par exemple, l'Argentine est un pays qui se trouve en Amérique du Sud qui présente une latitude de -22 à -55^0 . . .

Il n'existe pas actuellement de système informatique manipulant des connaissances de référence imprécises malgré une utilisation effective par les experts, et cela, quel que soit le domaine d'expertise.

1.4 Bilan et ouverture

Au niveau des connaissances à acquérir, les auteurs issus des sciences humaines font état de trois points fondamentaux qui sont la variation quantitative et qualitative des connaissances en fonction du degré de développement du sujet, l'impact de la motivation au sens large qui est lui aussi dépendant du degré de développement des connaissances, et finalement de l'indispensable prise en compte des connaissances antérieures dans le processus de l'apprentissage.

En ce qui concerne les logiciels existants, la répartition des connaissances dans le système est très modulaire. Les connaissances à acquérir sont regroupées dans un module, le module de l'expert.

Classiquement, les tuteurs disposent d'une modélisation des connaissances de référence relativement statique, c'est-à-dire qu'une connaissance est formulée et valable pour tous les stades d'acquisition de connaissance et aussi pour tous les sujets. Cette modélisation dépend, en fait, davantage des connaissances manipulées elles-mêmes que d'une prise en compte des utilisateurs en cours d'acquisition.

La prise en compte de l'aspect développemental des connaissances n'est cependant pas absente. En effet, quelques systèmes ont recours à une multiplication de point de vue pour une même connaissance. Un système comme QUEST [White 85] utilise par exemple des modélisations qualitatives différentes pour une même connaissance. Toutefois, même si cette multiplication des points de vue ou des modèles va dans le sens de la prise en compte de l'aspect développemental des connaissances du sujet, elle

reste insuffisante et trop isolée. Cette pluralité présente des états généraux et fixes à rapprocher d'une modélisation en degré d'expertise. A l'intérieur de chacune des modélisations, le caractère figé des représentations est retrouvé. Ainsi, dans un stade, il n'y pas d'évolution, même quantitative. Nous avons noté qu'au niveau des Sciences Humaines, la notion d'évolution est centrale et que celle-ci s'applique à la fois à du qualitatif et à du quantitatif.

Nos propositions concernant la représentation des connaissances de référence auront pour souci essentiel de permettre une modélisation dans laquelle, à l'intérieur de stades d'acquisition qualitatifs, une représentation du développement est possible. Quant au modèle de connaissance dans lequel nous faisons reposer notre travail, nous ne nous préoccupons pas d'une distinction des connaissances entre déclaratif et procédural. Nous rejoignons les contextualistes sur l'idée initiale qu'une connaissance n'a de sens qu'en contexte. Une connaissance est donc associée à son contexte (au niveau de la modélisation). Après cette première étape de modélisation, le processus d'acquisition est à rapprocher du modèle des connaissances d'Anderson [Anderson 90]. Au-dessus du premier niveau de connaissance qui associe une connaissance à son contexte, nous ajoutons une étape associative dans laquelle l'utilisateur va transférer, par analogie, les connaissances à d'autres contextes. L'efficacité de ces transferts est évaluée et donne lieu à une extraction des propriétés communes aux différents contextes. De l'extraction des traits ou propriétés communes de la connaissance et des contextes résulte un prototype. La notion de prototype est utilisée afin de mettre en avant l'idée d'abstraction des propriétés, des caractéristiques des contextes afin de constituer une connaissance structurée suffisamment générale pour s'appliquer à des situations variées tout en ayant un aspect spécifique pour être pertinente dans une situation particulière. Il y a acquisition dès la première étape envisagée. Toutefois, l'acquisition n'est "définitive" et complète que lorsque le prototype est construit. Sa construction est intéressante dans la mesure où la connaissance ainsi représentée va pouvoir être appliquée dans des contextes variés et ceci avec un coût attentionnel faible.

Les conséquences d'un tel choix théorique au niveau de la modélisation des connaissances et du processus général d'acquisition conduit à deux idées qui sont :

- si l'on obtient une performance de moins bonne qualité pour une connaissance donnée dans un nouveau contexte que celle préalablement obtenue, cela est probablement affectable à l'absence plus ou moins partielle d'un prototype et donc, à un processus d'acquisition des connaissances en cours ;
- si on limite l'attention disponible (limitation des ressources) pour une connaissance donnée par la réalisation d'une tâche autre mais impliquant l'intervention de la première, la performance obtenue pour la connaissance avec limitation de ressources est une image fidèle permettant de déduire l'étape dans laquelle se trouve le processus d'acquisition.

Dans l'optique d'une telle conception, il est nécessaire de se doter d'un système qui n'entrave pas le traitement et la représentation de connaissances "dynamiques" (au sens de connaissance en évolution constante). Ce système doit être ainsi capable d'évaluer des connaissances dans des contextes variés et de constituer, à partir d'une analyse fiable de celles-ci, un prototype de cette connaissance. Pour répondre à cet objectif, nous proposons un double niveau d'évaluation des connaissances. L'évaluation porte à la fois sur les connaissances directement manipulées par la tâche en cours et sur les connaissances intervenant ou covariant avec les premières. Nous développons nos propositions et les justifions dans la seconde partie de ce manuscrit et plus particulièrement dans le chapitre 6.

Chapitre 2

Les connaissances acquises

Dans un système d'apprentissage, il faut mettre en balance les connaissances à acquérir et celles que l'élève acquiert réellement. En effet, ce n'est pas parce que vous proposez une situation d'apprentissage que celle-ci conduit à une modification des connaissances du sujet, que ce soit à un niveau qualitatif ou quantitatif, et ceci de manière durable. La notion de durée est ici importante car l'élève, celui qui acquiert de la connaissance, doit transformer son état de connaissances et il faut que cette transformation s'inscrive dans le temps.

Dans cette section, il nous semble pertinent d'exposer les conceptions psychologiques de la rétention et de l'oubli dans un premier temps, ce qui revient à décrire le processus complexe de la mémoire ainsi que les défaillances qu'elle peut présenter.

Ensuite, nous verrons l'aspect de la modélisation des connaissances de l'apprenant acquises dans un tuteur informatique en abordant ici le contenu de cette modélisation au niveau du type de connaissances mais aussi, au niveau du formalisme utilisé.

2.1 Les phénomènes de rétention et d'oubli

Lorsque l'on évoque la mémoire, deux aspects doivent être distingués :

- le système physique ;
- le processus.

Malgré l'intérêt que le support physique du souvenir revêt, nous ne nous intéressons pas davantage aux structures biologiques impliquées dans les processus cognitifs en général et dans la mémoire en particulier

La mémoire, en tant que processus, permet de conserver et d'évoquer des états affectifs et de conscience, des informations acquises et des impressions enregistrées qui influencent le comportement. Elle est la persistance du passé et se réfère à des données autobiographiques aussi bien qu'à l'acquisition de connaissances générales. Elle n'est pas entièrement fidèle et subit des transformations suite aux reconstructions tributaires du fonctionnement cognitif [Bloch 94]. Si le passé peut être altéré par des reconstructions présentes, l'effet du passé sur le présent n'est pas à négliger ; les connaissances antérieures vont influencer sur les acquisitions actuelles et futures. La mémoire est un processus complexe qui comporte trois phases : l'apprentissage, le stockage de l'information et finalement, l'évocation ou la reconnaissance. Nous allons nous pencher, dans les sections suivantes, sur ces trois phases de la mémoire.

2.1.1 L'apprentissage

L'apprentissage est une modification relativement permanente du comportement qui marque un gain de connaissances, de compréhension ou de compétences [Papalia 88]. Une certaine indépendance fonctionnelle est établie de telle sorte que, par exemple, l'absence d'accès à la sémantique de mots ou d'objets n'empêche pas l'accès aux aspects perceptifs ou structuraux de ces items.

Mais comment se développe cette formidable machinerie qu'est le système mnésique ?

Il existe plusieurs hypothèses explicatives du développement de la mémoire. Celles-ci sont :

- d'une augmentation de la capacité de traitement de l'information ;
- de l'acquisition de stratégies mnésiques d'encodage et de récupération ;
- d'un développement de la capacité à manipuler de plus grandes bribes d'information (Chunks) en terme de mémoire immédiate ou d'empan mnésique ;
- de l'élaboration des capacités de schématisation interne.

Ces hypothèses sont étayées par différentes observations et expériences. Nous allons en décrire certaines dans les paragraphes suivants afin d'illustrer notre propos.

En vieillissant, les enfants génèrent à la fois des stratégies mnésiques plus complexes, qu'ils utilisent plus efficacement, et jumellent mieux ces stratégies aux tâches à mémoriser [Vasta 82]. Avec le développement, on assiste à de meilleures stratégies d'apprentissage et de récupération, à la naissance de la métamémoire et à celle de la connaissance du monde [Spreeen 88, Vasta 82]. Cette évolution se poursuit jusqu'à la fin de l'adolescence ou jusqu'à l'âge adulte. Par exemple, entre 5 et 7 ans, les enfants sont conscients que l'écriture de notes, ou tout autre indice de récupération tangible, peut les aider à mémoriser. Ils considèrent également que les items familiers sont plus faciles à rappeler que l'inverse, que les listes courtes sont plus faciles à apprendre que les longues listes, que la reconnaissance est plus facile que le rappel libre et que les oublis sont plus fréquents à mesure que le temps passe [Vasta 82]. Au fil de son développement, et après l'âge de 3 ou 4 ans, l'enfant développe de plus en plus la stratégie de répétition du matériel à apprendre. Rapidement, il adopte aussi d'autres stratégies, telle la catégorisation. La catégorisation nécessite une maturation d'une bonne mémoire de travail, à défaut de quoi l'enfant ne peut manipuler les items à mémoriser. A cet égard, les enfants d'environ 7 ans peuvent catégoriser, pour autant que les premiers items d'une liste demeurent visibles. Avant 9 ou 10 ans, l'enfant n'adopte pas spontanément de stratégie catégorielle. Cependant, la stratégie de répétition ne requiert plus d'effort pour les enfants de 12 ans, qui peuvent alors déployer leur énergie pour la catégorisation du matériel en terme de classes d'appartenance sémantiques. Les enfants de 10 ans et plus bénéficient d'une meilleure métamémoire, en ce sens qu'ils connaissent davantage leurs limites et cette compréhension aide l'enfant à mieux choisir la stratégie mnésique à utiliser [Vasta 82]. L'enfant peut donc bénéficier de l'enseignement d'une stratégie, mais ne l'utilise pas spontanément dans les premiers temps. Il a été toutefois observé que les enfants de 8 ou 9 ans ayant bénéficié de l'apprentissage de jeux stratégiques ou de méthodes de travail scolaire avec leur parent, peuvent catégoriser spontanément dès cet âge.

L'élaboration, telle l'imagerie mentale, est une autre stratégie d'apprentissage. Celle-ci est particulièrement utile lorsque la tâche de mémorisation est associée à deux stimuli ou plus, comme un mot d'une autre langue et son équivalent français. Cette stratégie est la dernière à se développer. Elle apparaît après celles de répétition et de catégorisation, et ce, rarement avant l'adolescence.

De manière récapitulative, entre 6 et 12 ans, les enfants progressent de la forme simple de répétition à une forme plus complexe et plus active, soit d'un processus de répétition simple à une élaboration et organisation des modes de mémorisation.

Toutefois, même si l'on peut observer que la capacité de mémorisation évolue au fil du développement, et ceci, en parallèle avec les stratégies utilisées et la métamémoire, il ne faut pas négliger, à notre

sens, un point central dans l'acquisition de connaissances ou d'apprentissage : de façon générale, les connaissances qu'un enfant possède sur un domaine particulier représentent un déterminant important de la quantité d'information qu'il va retenir à propos de ce sujet [Vasta 82]. En effet, on estime par exemple que pour comprendre un texte ou un sujet, il est nécessaire de maîtriser au moins 80% des notions du texte. Au delà de ce seuil, moins il y aura de notions inconnues, moins le sujet rencontre de difficultés. Dans un apprentissage, quel qu'il soit, il faut toujours tenir compte des connaissances actuelles de l'élève et apporter progressivement, et en faible quantité, de nouvelles connaissances afin que le sujet puisse les assimiler. Comme nous l'avons déjà montré dans le chapitre précédent, il est difficile de toujours tenir compte des connaissances antérieures, des préconceptions des sujets. Un grand nombre d'éducateurs oublie encore souvent que ce n'est pas parce qu'un domaine n'a pas été enseigné que l'élève n'a pas de préconceptions sur ce domaine. Il est indispensable de partir de ces préconceptions pour enseigner un domaine. Si cela n'est pas fait, on risque, dans le meilleur des cas de voir coexister des connaissances et les préconceptions initiales. Par exemple, des travaux cités dans [Mars-Gouraud 99] sur les conceptions en physique des étudiants ont montré que l'état des connaissances actuelles est fortement dépendant des préconceptions que l'on peut déjà rencontrer chez de jeunes enfants auxquels aucune notion de physique n'a été préalablement présentée.

2.1.2 Le stockage

Au niveau du stockage, l'idée d'une mémoire modulaire ou tout au moins plurielle n'est pas neuve. On distingue au moins deux types de mémoire [Craik 72, Atkinson 68] :

- une mémoire temporaire ou à court terme qui se caractérise par une capacité mnésique limitée. Elle a pour fonction de maintenir une trace provisoire d'un stimulus en attendant que celle-ci soit traitée et éventuellement transférée dans une mémoire plus permanente ;
- une mémoire à long terme dans laquelle l'ensemble des connaissances acquises et susceptibles d'être rappelées sont stockées.

Avec les travaux de Baddeley [Baddeley 86], un troisième dispositif a vu le jour, la mémoire de travail. Cette dernière est à l'origine de nombreuses études et est actuellement intégrée dans presque tous les systèmes mnésiques.

La mémoire de travail peut être considérée comme un système à capacité limitée qui gère à la fois des activités de stockage et des activités de traitement. Elle est constituée, selon le modèle de Baddeley [Baddeley 86, Baddeley 92], d'un contrôleur central qui est responsable de la répartition des ressources cognitives entre le traitement de l'information et le stockage de celle-ci. Dans ce dernier cas, elle peut utiliser, sous son contrôle, deux systèmes auxiliaires : une boucle articulatoire permettant la répétition de l'information verbale et son codage phonologique, et un agenda visuo-spatial pouvant stocker l'information visuo-spatiale. Par conséquent, dans ce dispositif, la limitation de capacité n'est pas à proprement parler de caractère structural, mais plutôt de caractère fonctionnel. Ainsi, si les capacités de déchiffrage en lecture (traitement) sont peu automatisées⁶ ou déficientes, le stockage du texte s'en ressent et, par conséquent, la compréhension en est affectée. On peut faire la même démonstration pour le raisonnement, le jugement, la résolution de problème . . . L'idée même de mémoire de travail présente l'avantage d'associer dans sa conception des contraintes structurales, fonctionnelles et opérationnelles, sans pour autant encourir les critiques qu'on a pu faire aux modèles qui prennent en considération une seule de celles-ci ; elle permet, de plus, d'aborder le problème de traitement dans des domaines complexes.

6. Automatisé est à prendre ici au sens du niveau d'attention faible nécessaire à la réalisation de la tâche.

2.1.3 L'encodage, la consolidation et la récupération

L'**encodage** est un processus de sélection et d'enregistrement par lequel des informations sensorielles, visuelles, auditives, tactiles et olfactives entrent dans le système mnésique pour former une trace sous forme de représentation mentale. L'encodage est cette entrée mnésique servant d'interface entre l'environnement et notre univers mental. En fonction de l'état affectif et de la capacité d'attention soutenue, l'information peut ou non être transférée ou "stockée" en mémoire à long terme [Tiberghien 91]. La qualité, davantage que la quantité de traitements à effectuer, détermine la rétention [Fortin 92]. Un individu peut entreprendre spontanément diverses opérations cognitives afin d'optimiser sa performance mnésique. Ces opérations cognitives incluent les stratégies d'organisation ou de catégorisation du matériel à mémoriser, l'utilisation de l'imagerie mentale, le recours à des médiateurs verbaux ou encore les transformations portant sur la modalité de présentation de l'information encodée. Le processus d'encodage fait référence non seulement à l'information ciblée, mais également à son contexte environnemental, cognitif et émotionnel. Cette information contextuelle permet de donner au matériel à retenir un caractère distinctif et fournit des indices de récupération ultérieure. La fréquence d'exposition crée également une familiarisation avec le matériel à retenir [Fortin 92].

La **consolidation** est un processus dynamique et graduel qui permet la réorganisation et la stabilité de l'information retenue. Par ce processus, la mémoire devient plus résistante à la dislocation.

Quant à la **remémoration ou récupération**, elle constitue l'ensemble des processus qui permettent l'utilisation des traces mnésiques librement, en reconnaissance ou avec indices. La reconnaissance permettra de nuancer entre une difficulté d'accès et la capacité d'emmagasiner en mémoire à long terme.

2.1.4 L'oubli

L'oubli peut se définir comme une impossibilité provisoire ou définitive d'accéder consciemment à une information acquise ou à une expérience vécue dans le passé immédiat ou lointain. Il est possible, dans ces conditions, que l'impact de cette information ou expérience sur le comportement ou l'activité cognitive se poursuive sans que le sujet ait conscience qu'il s'agit là de l'influence de son passé. Bien que l'oubli constitue une expérience subjective particulièrement aiguë pour ceux qui en sont les victimes, il est très difficile de faire la démonstration objective qu'une information est définitivement perdue et surtout qu'elle reste inactive. C'est pourquoi, certains modèles considèrent qu'hormis le cas où les sujets souffrent de lésions cérébrales, il n'y a pas de perte d'information en mémoire mais seulement un défaut d'accessibilité. Ceci reprend une distinction déjà ancienne proposée par Tulving [Tulving 88] entre une information disponible et une information accessible : une information peut être disponible, c'est-à-dire représentée dans le système mnésique, mais inaccessible, au moins provisoirement, parce que le contexte dans lequel elle se trouve présentée ne correspond pas au contexte d'encodage.

L'oubli est souvent considéré par ceux qui en font l'expérience comme une sorte de pathologie de la mémoire. S'il y a des cas où l'oubli est la conséquence d'un traumatisme affectant la mémoire, il y a bien d'autres situations où l'oubli n'est pas autre chose qu'une conséquence en quelque sorte du fonctionnement de la mémoire de l'homme et non la marque d'un dysfonctionnement. A ce titre, on peut considérer que, loin d'être une limitation, l'oubli normal constitue une nécessité. Les systèmes "intelligents" artificiels n'oublient pas, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas encore capables de modifier significativement leurs connaissances en fonction de leur expérience du monde. On peut dire, même s'il nous arrive souvent de pester contre les limites de notre mémoire, que l'oubli constitue une nécessité fonctionnelle.

L'oubli banal

La psychologie a tenté de proposer diverses théories de l'oubli. Les deux plus connues sont celles que nous développons ci-dessous.

La théorie de la trace. C'est le déclin spontané des traces ou la limitation de la capacité de la mémoire à court terme, qui est responsable de l'oubli ; autrement dit, si pour une raison quelconque, l'information contenue en mémoire à court terme ne peut pas être entretenue par la répétition mentale par exemple, ou ne peut pas être transférée en mémoire à long terme, sa trace s'affaiblit et disparaît. Dans la mémoire à court terme, l'espace disponible est limité (on parle généralement de sept éléments plus ou moins deux). Lorsque l'espace est totalement occupé, le contenu de l'élément le plus ancien est vidé, la trace de son contenu est alors perdue si celui-ci n'a pas fait l'objet d'un traitement quelconque (répétition, mémorisation ...).

La théorie de l'interférence. Dans la théorie de l'interférence, il n'y a pas plusieurs dispositifs de stockage : ce qui entraîne l'oubli, c'est à la fois les caractéristiques de construction du matériel et les contraintes temporelles qui président aux activités successives de l'homme. Alors que pour la théorie du déclin, c'est le temps qui passe, non occupé par une utilisation de l'information stockée, qui entraîne l'affaiblissement puis la disparition de cette information, pour la théorie de l'interférence, c'est le caractère successif des activités plus ou moins similaires effectuées par le sujet qui est responsable de l'oubli. Ces effets d'ailleurs peuvent être bidirectionnels :

- interférence pro ou rétroactive ; une tâche qui est en train de se dérouler peut affecter ce qui se passe par la suite (interférence proactive) ; une tâche qui se déroule à l'heure actuelle peut avoir des incidences sur la trace de ce qui s'est passé antérieurement (interférence rétroactive) ;
- effets inhibiteurs ou facilitateurs ; ces effets peuvent être inhibiteurs, dans la mesure où ils affaiblissent les souvenirs, ou facilitateurs comme dans le cas de l'entraînement et des transferts positifs.

2.1.5 Un premier bilan

L'idée qu'il faut retenir ici est qu'il existe plusieurs types de mémoire qui ont chacune leur spécificités en termes de contenu, de méthode ou de stratégie d'apprentissage, d'accès et de vitesse d'accès à ces différentes entités. Toutes ont néanmoins en commun un point fondamental : leur fonctionnement présent dépend de leur fonctionnement passé. Dans un processus d'acquisition, surtout si celui-ci se veut individualisé et interactif, il faut tenir compte des connaissances antérieures et des possibilités du sujet puisque comme nous l'avons vu par exemple pour les stratégies utilisées dans la mémorisation d'information, la possession d'une stratégie optimale pour un matériel donné n'implique pas son utilisation. De plus, la non manifestation explicite d'une connaissance ou l'oubli apparent n'est pas forcément synonyme d'une perte de l'information. Par conséquent, il est nécessaire de tenir compte de toutes les productions et de ne pas considérer comme perdue une connaissance qui ne se manifeste plus. Ce point sera repris dans notre travail au niveau de la prise en compte des réponses des sujets dans la synthèse des connaissances à la page 134.

Le dernier point que nous voulons évoquer ici relève des variations interindividuelles que nous pouvons rencontrer tant au niveau des stratégies utilisées, des connaissances acquises que des empanns mnésiques des différentes entités et ceci, quel que soit l'âge du sujet (adulte, adolescent, enfant). En effet, une grande variabilité interindividuelle est observable lorsque l'on s'intéresse aux processus cognitifs et aux processus mnésiques en particulier. Il est donc difficile de produire des conclusions génériques et des stratégies éducatives efficaces pour un groupe complet d'individus. Cependant, il est impératif de concevoir un système de guidage destiné à un individu réel, qui puisse s'adapter à une vitesse d'acquisition particulière, un enchaînement des tâches individuel et un niveau de performance imprévisible, et non à un groupe ou un à individu épistémique.

Ce point constitue également une des contributions de notre travail. Nous le développons dans la section 7.1.

2.2 La modélisation des connaissances de l'apprenant dans un tuteur

La modélisation de l'apprenant dans un système informatique est une problématique complexe. Afin de faciliter la compréhension de notre exposé, nous nous proposons d'illustrer notre propos en tentant de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les informations que doit contenir un modèle de l'élève ?
Nous envisagerons ce point dans la section 2.2.1, ainsi que l'organisation de ces connaissances au niveau architectural ;
- Comment représenter ces informations ?
Nous détaillerons dans la section 2.2.3 les différents modes de représentation utilisés dans les tuteurs ou les didacticiels existants.

2.2.1 Le modèle de l'élève : Quoi et où ?

Afin de mettre en place un enseignement efficace et justifier l'utilisation d'un EIAO dans un domaine particulier, il faut permettre une interaction système-utilisateur individualisée [Kass 87, Self 88]. Pour ce faire, outre les connaissances à enseigner, le système doit disposer d'informations précises et fiables sur son utilisateur. Les tuteurs et didacticiels sont par conséquent dotés d'un module dans lequel sont regroupées toutes les informations dont le système dispose sur l'utilisateur. Ces dernières peuvent recouvrir un éventail très large : des connaissances sur le domaine enseigné, un intérêt pour ce domaine, le fonctionnement et les préférences en matière de stratégies pédagogiques, les connaissances supposées maîtrisées par le sujet, etc.

La principale fonction du modèle de l'élève est de rassembler toutes les informations qui pourraient permettre une optimisation de l'interaction utilisateur-système et ceci, dans un formalisme utilisable par le reste du système. Les choix réalisés ici conditionnent le mode de fonctionnement mais aussi les potentialités du système entier.

L'ensemble des systèmes peut être divisé suivant un certain nombre de critères relatifs aux moyens qu'ils utilisent pour stocker les informations sur l'apprenant, aux méthodes de construction appliquées pour élaborer le modèle de l'élève, ainsi qu'à l'utilisation qu'ils font de cet ensemble d'informations. Ces critères sont présentés explicitement ci-dessous :

- le *degré d'explicitation* du modèle de l'élève : le modèle est dit *implicite* lorsque les paramètres décrivant l'élève et influençant la gestion de l'interaction sont valués par le concepteur du didacticiel et sont incorporés "en dur" dans le système, et *explicite* lorsque les informations sur l'apprenant sont explicitement gérées par le tutoriel (c'est-à-dire codées et utilisées par le système pour gérer l'interaction) [Holt 94] ;
- le *degré de spécificité* du modèle : le modèle peut être plus ou moins spécifique. Ce degré est valué sur une échelle allant de *canonique* ou générique, s'il représente une catégorie d'utilisateurs, à *individuel* lorsqu'il modélise un seul et unique individu [Holt 94] ;
- la *durée d'utilisation* du modèle : il peut être utilisé à *court terme* si celui-ci porte sur une de ses réponses ou sur une session, ou à *long terme* si la modélisation est effectuée sur plusieurs sessions [Huang 90] ;
- la *modifiabilité* du modèle : le modèle peut être *statique* c'est-à-dire déterminé avant toute utilisation, ou bien *dynamique* c'est-à-dire modifiable en cours de session [Kass 87] ;
- les *moyens d'acquisition* du modèle : le modèle peut être acquis de façon *interactive*, en posant des questions à l'élève, ou bien *inférentiel* si le modèle est inféré du comportement de l'élève ;
- l'*utilisation* du modèle : le modèle peut être utilisé *descriptivement* si le système se contente de puiser l'information contenue dans le modèle, ou *prescriptivement* si le système exécute le modèle

pour simuler l'élève [Kass 87] ;

- la *profondeur* du modèle [Wenger 87, Dillenbourg 91] : le modèle est dit de surface ou *comportemental* lorsqu'il contient des informations qui sont inférables directement à partir de la réponse de l'élève, et profond ou *épistémique* dans le cas où il contient des informations plus représentatives de l'état cognitif de l'élève comme les causes des erreurs effectuées.

Dans la suite de notre exposé, nous nous intéressons uniquement au système présentant un modèle de l'élève qui modélise l'interaction avec un utilisateur et non un groupe, qui présente une durée d'utilisation à long terme, qui soit dynamique, inférentiel, descriptif et comportemental. Ce choix découle du fait qu'il nous paraît évident que ce sont dans ces systèmes que l'adaptativité à l'utilisateur est la plus fondamentale, la plus complexe à mettre en œuvre, mais aussi la plus objective dans la mesure où il n'y a pas un niveau interprétatif dans le traitement des réponses de l'élève.

Pour clarifier l'exposé du modèle de l'élève, on peut distinguer deux types d'informations parmi celles dont dispose le modèle : les connaissances permanentes et les connaissances évolutives [Gavignet 91]. Les premières sont données lors de la session d'initialisation du système pour un sujet particulier ; elles sont constituées des renseignements personnels (état civil, particularités permanentes du sujet telles que le port d'un appareil auditif dans le cas de GEREV) et des objectifs pédagogiques. Il n'y a pas de remise à jour nécessaire pour ce type de connaissances.

Quant aux secondes, les connaissances évolutives, elles constituent une synthèse du résultat de l'interaction système-utilisateur (les acquis de l'utilisateur, l'historique). Par conséquent, c'est à ce niveau que l'individualisation de l'interaction du système se joue. La modélisation des connaissances estimées doit être à la fois la plus complète possible et refléter le niveau actuel de l'utilisateur. Deux difficultés sont à relever ici ; la première est relative à l'écueil fréquent d'une part des systèmes qui emmagasinent de grosses quantités d'informations inutilisables par le système lui-même [Self 88]. La seconde difficulté touche, quant à elle, à la mise à jour des connaissances contenues dans le modèle. Celle-ci doit être fréquente et si possible dynamique afin de suivre parfaitement l'évolution des connaissances du sujet. La fréquence de rafraîchissement des connaissances détermine la qualité de l'adaptation du système. Nous avons à maintes reprises insisté sur le caractère évolutif des connaissances dans un processus d'acquisition. Si le système n'est pas en mesure de suivre et de modéliser en direct cette évolution, il ne peut proposer un guidage qui tienne compte de l'état du sujet. Les rétroactions que le système fournit alors à l'utilisateur risquent d'être inutilisables ou tout au moins non pertinentes.

A ces deux types de difficultés, spécifiques au choix réalisés lors de la conception du modèle, viennent s'ajouter des artefacts dont il faut être conscient ; le système recueille, organise, représente des informations d'une manière qui dépend du formalisme représentationnel. En effet, le formalisme et le domaine couvert par le système conditionnent le contenu du modèle et les connaissances modélisables dans celui-ci. Il est par ailleurs assez difficile de synthétiser l'intégralité des réponses comportementales d'un utilisateur ou d'inférer l'état cognitif d'un sujet, ses intentions, ...

De plus, il faut tenir compte de la validité des informations modélisées dans la mesure où celles-ci sont issues de plusieurs sources. Ces dernières sont :

- l'utilisateur lui-même. Dans un certain nombre de systèmes, l'évaluation des connaissances, et la mise à jour des données dans le modèle de l'élève, se fait de manière interactive c'est-à-dire que le système demande au sujet de confirmer ou de lever des ambiguïtés de diagnostic. Lorsque l'utilisateur est considéré comme une source directe de connaissance, le modèle de l'élève est dit interactif. Le problème majeur de ce type de modèle est d'une part l'objectivité réelle de l'élève dans l'évaluation de ses compétences et d'autre part, la compréhension des termes utilisés lors de l'interaction pour établir un diagnostic qui peut donc induire, si la terminologie des requêtes n'est pas parfaitement maîtrisée, des réponses inexacts ;
- le système. Le problème relève davantage de l'efficacité du système à établir un diagnostic et donc

à mettre à jour des connaissances de manière fiable, ainsi que de sélectionner avec suffisamment de précision les informations pertinentes pour l'établissement de la modélisation de l'élève. A partir d'une observation de comportement, qui est plus ou moins importante, le système diagnostique un état de connaissances et par cela, induit une rétroaction. La validité d'un tel diagnostic est sujette à caution : on ne peut associer à un comportement un état de connaissance et un seul.

2.2.2 Modélisation de l'état cognitif de l'apprenant

Dans les systèmes actuels, la modélisation de l'état cognitif de l'apprenant peut suivre trois approches différentes [Holt 94] : par recouvrement, par perturbation, par primitives. Ce qui distingue ces trois approches réside dans les rapports entretenus entre la modélisation des connaissances de référence et celles de l'élève. Le choix d'une de ces approches conditionne la puissance de description des connaissances de l'utilisateur, d'où notre décision de présenter ici les trois approches ainsi que leurs conséquences sur la modélisation de l'état cognitif de l'apprenant.

Approche par recouvrement

La modélisation par recouvrement, *overlay* [Vanlehn 88] ou expertise partielle [Nicaud 88] consiste à encoder uniquement la connaissance experte dans le tutoriel. Par conséquent, les connaissances de l'élève sont considérées comme un sous-ensemble de la connaissance experte. L'objectif d'un système utilisant ce type de modélisation est de faire tendre au maximum les connaissances de l'élève vers celles de l'expert.

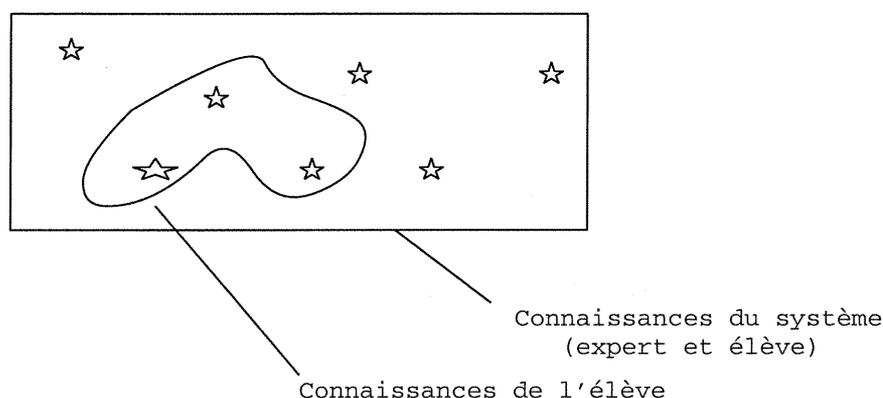


FIG. 2.1 – Modélisation par recouvrement

Nous montrons sur la figure 2.1 les relations existantes dans cette conception. Dans cette optique, la représentation des connaissances de l'élève est assez facile à implanter : soit une connaissance est acquise soit elle ne l'est pas. La différence entre la modélisation de l'expert et celle de l'élève est essentiellement quantitative. Cette technique est applicable chaque fois que l'expertise est représentée sous la forme d'un système de règles de production. Les tutoriels GUIDON [Clancey 83] ou WUSOR [Wenger 87] utilisent une technique de ce type et Goldstein [Goldstein 82b] rappelle que la mise à jour du modèle de recouvrement repose sur plusieurs sources d'informations :

- les informations implicites qui découlent de la comparaison entre le comportement de l'élève et les décisions de l'expert. L'acquisition de ces informations dépend de la capacité du concepteur à relier un comportement donné à un ensemble bien défini de réalisations effectives ;

- les informations structurelles qui relèvent du réseau de dépendances et de complexité qui sont relatives aux différentes compétences en jeu. Ce réseau couvre en quelque sorte les zones sur lesquelles l'apprentissage doit se centrer ;
- les informations explicites qui peuvent être obtenues par un questionnement direct de l'élève (test ou questionnaire) ;
- les prérequis supposés, inférés ou stockés lors d'une précédente séance pour initialiser le modèle.

Dans la mesure où ce type de modèle compare les connaissances de l'expert avec celles de l'élève, les sources d'informations à considérer sont celles relatives à l'expert c'est-à-dire en d'autres termes celles concernant le domaine de connaissances et celles relatives à l'élève (les prérequis, les connaissances du sujet . . .). Deux limitations sont généralement invoquées à propos de ces techniques de recouvrement : la première tient au problème plus général de la représentation des connaissances dans le module expert, étant donné que la représentation des connaissances de l'élève en découle directement. Les connaissances du novice correspondent bien souvent non pas à un sous-ensemble des connaissances de l'expert mais à une conceptualisation globalement différente du domaine. Pour dépasser cette difficulté, il faudrait imaginer pour chaque problème plusieurs modèles d'experts régulés par un méta-expert qui choisirait le modèle approprié à la démarche de l'élève. Une solution à un tel problème est envisagée dans les systèmes gérant des modèles qualitatifs tels que QUEST [White 85] ou dans des systèmes multipliant les points de vue. Néanmoins, même si ces logiciels présentent une avancée conceptuelle importante, ils ne proposent pas encore la solution idéale parce que trop restreinte ou trop prédéterminée. Le méta-expert, au sens d'expert capable à partir d'informations générales de construire la conceptualisation de l'élève dans un domaine et de fournir une évaluation adaptée, n'existe pas encore.

La seconde limitation est liée au modèle lui-même. Le paradigme de recouvrement présuppose qu'une performance non optimale est le résultat d'un mauvais choix stratégique et non celui d'une erreur opératoire commise lors du déroulement d'une stratégie dont la validité est pourtant avérée. Cette nuance importante sera au centre des préoccupations des "buggy models" déclinés dans le paragraphe suivant.

Approches par perturbations

Une autre approche consiste à utiliser les erreurs les plus fréquemment rencontrées chez les élèves comme des variantes possibles du modèle de l'expert [Brown 78]. Ce point est illustré sur la figure 2.2. Ici, l'erreur est la résultante d'une déviation opératoire d'une connaissance correcte. Les connaissances du système sont constituées des connaissances correctes (connaissances expertes) et des erreurs ou artefacts découlant d'une mauvaise application de ces connaissances.

BUGGY et les systèmes DEBUGGY et IDEBUGGY, dans le domaine de l'enseignement de l'algèbre, sont les exemples les plus représentatifs de cette approche. Ils ont démontré à la fois la faisabilité et la pertinence, pour un domaine restreint donné, de la mise au point d'un catalogue complet d'erreurs de nature procédural. Les implications de recherches de ce type sur l'étude des processus d'acquisition tiennent au fait que comprendre l'origine des "bugs" (en étant capable de les reproduire artificiellement) a des conséquences non négligeables sur les stratégies pédagogiques de remédiation.

Le système BUGGY [Wenger 87] conçu pour permettre à des enseignants de s'entraîner à identifier les causes des erreurs généralement commises par les élèves lors des soustractions multi-colonnes utilise un catalogue d'erreurs. Le système génère des réponses inexactes, en simulant le comportement d'un élève. Cela est réalisable par l'intermédiaire de règles correctes et de règles conduisant à un comportement incorrect qui figurent dans son catalogue d'erreurs. Par exemple, le système possède une malrègle qui dit que, pour chaque colonne, la soustraction des deux chiffres de la colonne se fait en soustrayant le plus petit chiffre du plus grand, sans tenir compte des positions respectives des deux chiffres.

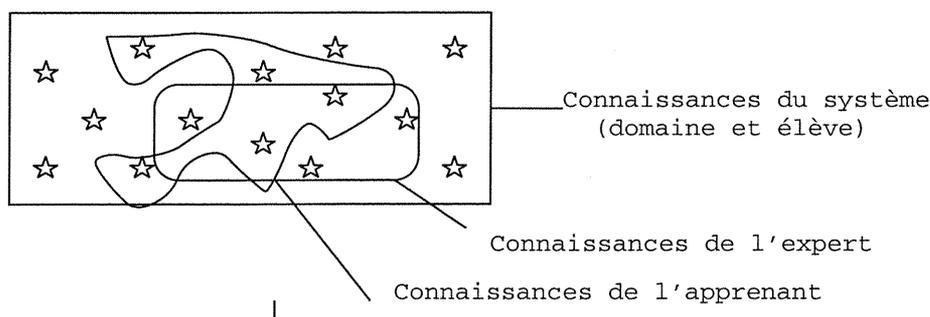


FIG. 2.2 – Modélisation par perturbation

Néanmoins, la nécessité de concevoir l'ensemble des erreurs qui sont considérées comme des perturbations des règles correctes, est un inconvénient majeur car coûteux en temps. La conception de ce catalogue peut, par ailleurs, nécessiter l'élaboration d'une théorie des erreurs [Wenger 87] qui associe les erreurs fréquentes du domaine d'enseignement concerné à leurs causes. Toutefois, cette théorie n'existe pas forcément *a priori* et son élaboration requiert une analyse manuelle détaillée d'un nombre important de réponses d'élèves. Ajoutons au coût en temps important le fait que la capacité d'individualisation du système est directement liée à l'exhaustivité du catalogue. Par conséquent l'efficacité d'une telle technique reste discutable.

Dans le but de supprimer ces inconvénients inhérents à la notion de catalogue d'erreurs, certains concepteurs ont proposé la notion de "constructeur" au sein de ces catalogues. Le principe en est simple : proposer un ensemble de composants qui vont permettre au système de construire dynamiquement les représentations des erreurs potentielles des élèves. Un tel procédé est utilisé dans SARAH [Siou 94]. Dans ce système, la construction des erreurs est réalisée par l'intermédiaire de la programmation logique inductive.

Cette technique a principalement été utilisée lorsque la connaissance est de nature procédurale et lorsque celle-ci est représentée à l'aide de règles de production. Le catalogue contient des constructeurs qui agissent à la fois sur les conditions et sur les conséquences. Ceux-ci peuvent être combinés afin d'obtenir respectivement la condition qui reflète le contexte de résolution du problème de l'élève, ainsi que l'action qui a été exécutée par l'élève dans ce contexte [Vanlehn 88].

Malgré ces avancées, une théorie des erreurs est toujours requise pour l'élaboration des constructeurs. Qui plus est, cette élaboration nécessite une analyse plus fine des fautes éventuelles que celle nécessitée par la détermination d'un catalogue d'erreurs. Enfin, il faut que les combinaisons d'erreurs couvrent l'ensemble des erreurs effectives, sans en créer qui soient irréalistes.

Approches par primitives

Pour combler les inconvénients de l'approche précédente, certains chercheurs ont proposé la conception et l'utilisation de "brique de base" ou primitive qui permet par assemblage de représenter les connaissances de l'expert mais aussi de l'élève et donc les erreurs possibles. Cette conception est illustrée au travers de la figure 2.3.

En fait, une brique de base est un élément, un morceau de connaissance et non une connaissance à part entière. Pour constituer une connaissance, il faut regrouper plusieurs briques. Ainsi, le caractère correct/incorrect est lié à une combinaison de primitives et non à une seule primitive [Beller 93]. Le principe est donc relativement simple ; il consiste à déterminer ces briques qui permettent par combinaison de représenter l'intégralité ou presque des connaissances et des erreurs sans avoir à déterminer un ensemble

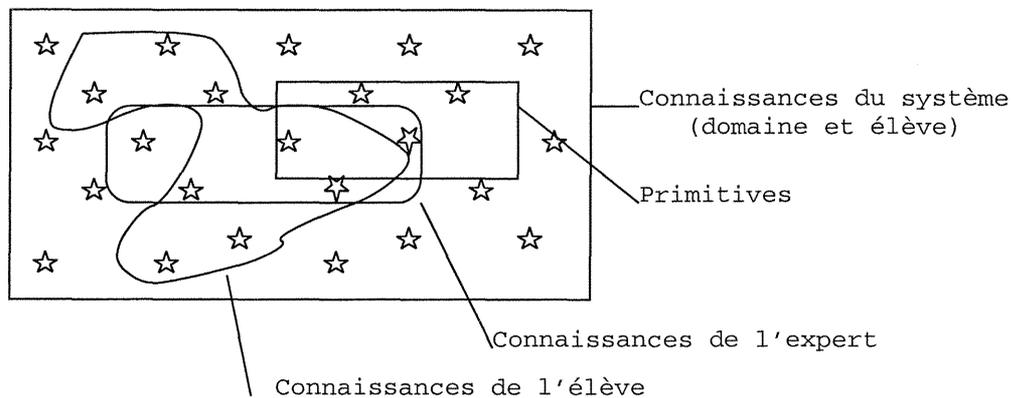


FIG. 2.3 – Modélisation par primitives

de perturbations et cela, malgré la présence d'erreurs imprévues initialement par le concepteur.

Cette technique semble idéale. Néanmoins, la détermination des primitives est une tâche relativement coûteuse. En effet, il est indispensable ici encore de disposer d'une théorie des erreurs pour constituer la modélisation des connaissances expertes et des erreurs en primitives utilisables. Ceci, comme nous l'avons signalé page 39 est une tâche requérant une analyse en profondeur du domaine dont on ne dispose pas *a priori*. De plus, lors de l'évaluation des réponses de l'élève, il n'est pas évident de différencier les réponses erronées des réponses correctes dans la mesure où le caractère correct ou incorrect découle des combinaisons et non des briques elles-mêmes.

Après nous être penché sur les rapports existant entre les connaissances expertes et celles de l'apprenant, nous allons voir les différents formalismes rencontrés dans les tutoriels existant qui ont également un impact sur les potentialités du système au sens où nous l'avons signalé page 37.

2.2.3 Modélisation des connaissances dans le profil de l'élève

Nous avons dans la section précédente présenté le modèle de l'élève et ses fonctions. Ici, nous nous plaçons à un niveau moins théorique en abordant la notion de *profil de l'utilisateur* ou de l'élève. En effet, alors que le modèle est une sorte de classe, au sens objet, qui contient toutes les fonctionnalités et méthodes de la modélisation des utilisateurs, le profil est une instance, une modélisation des connaissances d'un utilisateur particulier dont dispose le système.

C'est à partir du profil que l'individualisation de l'interaction est mise en place. Les fonctionnalités principales dont il dispose sont celles héritées du modèle de l'élève et décrites par Self [Self 88] : correction de l'erreur, aide à l'élaboration d'une action à entreprendre quand l'erreur est due à une procédure incomplète, mise en œuvre d'une stratégie globale pour proposer un nouveau plan d'action, construction d'un diagnostic, prévision d'actions futures (fonction prédictive) et enfin évaluation du travail fourni par l'élève.

Pour être totalement efficace, le profil doit modéliser au mieux les connaissances manipulées par l'utilisateur, que celles-ci soit justes ou déviantes par rapport à celles attendues. Par conséquent, nous décrivons dans la suite du texte un exposé des représentations des connaissances modélisées dans le profil de l'élève. Le recours à ces différents formalismes reflètent l'utilisation de types de connaissances variées et d'utilisations différentes du profil dans les systèmes (voir la section 2.2.1).

Nous proposons d'aborder les différents formalismes en opposant deux types de modèles de l'élève :

- ceux modélisant les connaissances correctes et les erreurs produites par l'élève ;

- ceux introduisant d'autres notions telles que la notion de contexte, la notion d'incertitude sur les connaissances maîtrisées ...

Connaissances correctes et non correctes

Nous verrons différents formalismes utilisés pour modéliser l'état de connaissances de l'apprenant : les graphes génétiques, la logique floue. Ces formalismes proposent un grand éventail de possibilités représentationnelles des connaissances correctes, des erreurs et même de l'absence de connaissances.

Les graphes génétiques. Le profil de l'élève dans WUSOR III est constitué à la fois du sous-ensemble des nœuds du graphe génétique de l'expert considéré acquis par l'élève et du sous-ensemble des arcs du graphe qui représente les stratégies d'apprentissage maîtrisées par l'élève [Wenger 87]. Les stratégies d'apprentissage sont induites à partir des relations existant entre les connaissances utilisées par le sujet. Ces relations sont représentées sous la forme de règles de production. Quatre types de liens sont définis : généralisation/spécialisation, analogie, raffinement/simplification, déviation/correction.

Par ce biais, le système dispose de toutes les connaissances observables, explicites, dont le sujet s'est apparemment servi, que ce soit des connaissances correctes (ou des erreurs) et les stratégies d'apprentissage. On peut obtenir une représentation assez complète des connaissances de l'utilisateur dans le système puisqu'en plus des stratégies d'apprentissage et des connaissances correctes, les erreurs, considérées comme des déviations des connaissances correctes et représentées par des nœuds spécifiques, sont manipulées par le système. Cela est rendu possible par l'utilisation de nœuds spécifiques reliés par des liens de déviation [Wenger 87] aux nœuds représentant les connaissances correctes.

Toutefois, les inconvénients inhérents aux réseaux sémantiques, c'est-à-dire leur caractère *ad hoc* et les conséquences qui en découlent, sont également présents dans les graphes génétiques. Dans WUSOR III par exemple, ce point se retrouve notamment dans la définition des liens du graphe. En particulier, des liens autres que ceux utilisés peuvent être imaginés [Kass 88] et/ou utilisés par l'élève mais non reproduits dans son profil. Par conséquent la représentation des connaissances de l'utilisateur, sur laquelle se base le système pour individualiser l'apprentissage, même si elle permet de modéliser un grand nombre de connaissances justes et incorrectes, n'est pas, analysée sous cet angle, pleinement satisfaisante.

La logique floue. Ce formalisme permet aux concepteurs de tuteurs d'énoncer facilement des règles de gestion de l'interaction, notamment à cause de l'utilisation des termes flous. Ceux-ci permettent d'exprimer des règles telles que "si l'élève maîtrise très bien la connaissance c_i , on peut commencer à lui enseigner la connaissance c_j " qui sont très proches du langage naturel. De plus, la notion d'imprécision sous-jacente aux formalismes flous permet de prendre en compte des bruits éventuels, puisque les mesures ne sont faites qu'avec un certain degré de précision qui peut englober les informations bruitées.

XTRA-TE [Chen 89] modélise les connaissances de l'apprenant grâce à ce formalisme. Le profil de l'élève est un ensemble de couples (<connaissance><probabilité>) dans lequel <probabilité> représente le degré de familiarité de l'élève pour la connaissance notée <connaissance>. Les concepteurs de ce système modélisent ainsi les connaissances supposées acquises et les connaissances non acquises. Entre ces deux possibilités, le système peut modéliser divers degrés de maîtrise de la connaissance comme cela est présenté sur un schéma sommaire des pseudo-fonctions de détermination du niveau de familiarité de l'élève pour une connaissance cible (figure de la page 43). Dans cette application, le formalisme ne modélise pas les erreurs de l'élève.

Ce formalisme et son utilisation dans XTRA-TE est intéressant puisque l'état des connaissances correctes de l'élève n'est pas décrit en tout ou rien. Cela permet par exemple de tenir compte des connaissances approchées ou en cours d'acquisition et de l'imprécision des mesures ou des traitements. Dans le modèle de l'élève de ce système, l'imprécision due aux divers bruits est prise en compte par les

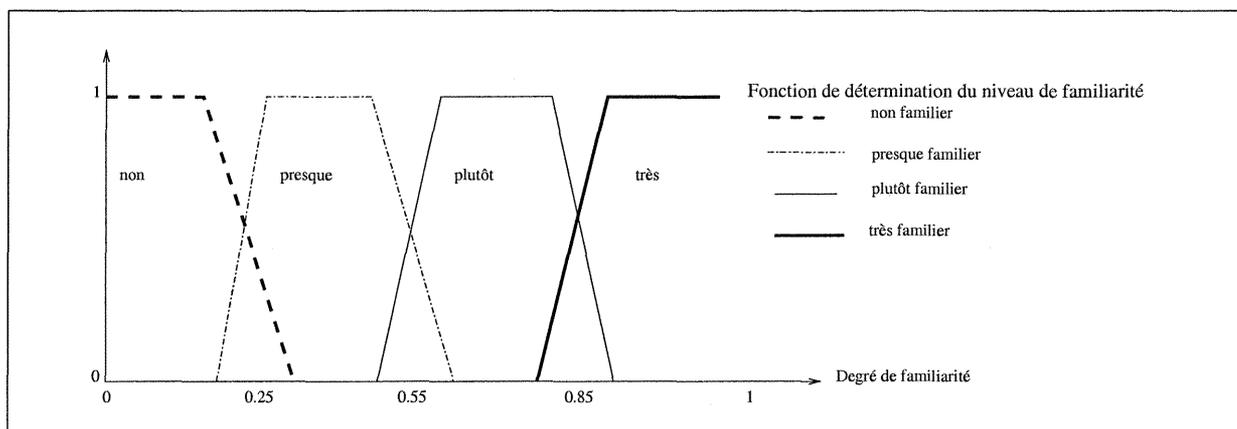


FIG. 2.4 – Représentation, à l'aide de la logique floue, du degré de familiarité pour une connaissance dans XTRA-TE

différents ensembles flous et non au niveau de l'attribution à une catégorie. D'autres systèmes tel que SHERLOCK II [Katz 94] tirent profit du même formalisme dans des conditions et un esprit similaires.

TAPS pour *Training in Arithmetic Problems* [Murray 91] utilise quant à lui la logique floue pour modéliser la connaissance de l'élève, les erreurs, et réagir en conséquence. Le choix de ce formalisme pour TAPS a été réalisé essentiellement afin de prendre en compte la notion d'information bruitée qui est un facteur important pour ses concepteurs. L'objectif ici est de tenir compte des erreurs commises par l'élève sans toutefois réagir de manière abusive et excessive, c'est-à-dire en acceptant une réponse approchée, qui résulte peut être d'un peu d'inattention, sans conclure immédiatement à l'idée de notion inexacte, d'erreur. Pour réaliser cela, le système gère un ensemble flou par type d'erreur généralement commise. Lorsque le degré d'appartenance à un des ensembles flous dépasse un seuil prédéterminé par les concepteurs, le tuteur considère alors que l'élève possède des notions inexactes et réagit en conséquence. La difficulté majeure de ce système est donc la détermination de la valeur seuil à partir de laquelle le système réagit. Ici encore, on voit aisément l'intérêt de l'utilisation d'un tel formalisme ; il permet au système de tenir compte de toutes les réponses du sujet tout en ne réagissant que lorsque cela est nécessaire, dans la mesure toutefois où les seuils sont fixés correctement.

Connaissances correctes, erreurs et le reste ...

La logique classique Quelques systèmes ont utilisé ce formalisme pour représenter la connaissance de l'élève. Les particularités et les avantages de ce système de représentation reposent essentiellement sur la clarté du formalisme qui résulte d'une syntaxe et d'une sémantique définies et claires [Besnard 89]. Cette clarté du formalisme permet à différents lecteurs d'une même formule de lui attribuer une sémantique unique. Qui plus est, ces systèmes logiques permettent de décrire des connaissances d'une façon compréhensive tout en étant formulées dans un langage synthétique [Haton 91]. Quant à la puissance du formalisme, deux aspects peuvent être distingués : une puissance au niveau de la couverture du monde décrit et une puissance au niveau du raisonnement. Chaque raisonnement logique obéit à une sémantique et à une syntaxe précises. En outre, les règles de raisonnement sont facilement disponibles. Elles sont fondées sur le *modus ponens*, le *modus tollens*, la *résolution* et la *spécialisation universelle*. Dès lors, en appliquant les règles et les mécanismes de la logique sur le contenu d'une base de connaissances, on obtient automatiquement de nouvelles connaissances à partir de celles possédées à l'instant précédent.

Pour illustrer ce formalisme, nous présentons le conseiller en programmation en Lisp, SCENT [Brecht 89] dans lequel trois prédicats logiques (SK, ?SK, MC) sont définis pour décrire les connaissances du système. Ceux-ci permettent de modéliser différents types de connaissances ; de celles que "l'élève sait..." (prédicat SK), en passant par celles dont "on n'est pas sûr de ce que l'élève sait à propos de ..." (prédicat ?SK), et finalement, celles dont on sait que "l'élève possède la malrègle..." (prédicat MC). Ainsi, le système dispose d'un mode de représentation qui va lui permettre de déterminer l'état de connaissances du sujet. Cet état est statique et indépendant des contextes, c'est-à-dire que le système modélise les informations dont il dispose sur le sujet pour chaque connaissance. Il répond en fait à la question : "Cette connaissance est-elle connue du sujet?" Les valeurs de vérité sont ici "oui" et "on est pas sûr".

Ainsi, un modèle peut statuer par exemple que l'élève ne connaît pas le principe de la récursivité, mais qu'il connaît la structure d'une conditionnelle, ce qui est nécessaire pour concevoir un programme récursif. Il peut aussi préciser que le tuteur n'a pas obtenu d'information quant à la connaissance de l'apprenant sur le fait qu'un programme récursif doit comporter un cas d'arrêt, et que l'apprenant est connu pour commettre des erreurs lorsqu'il utilise le connecteur logique OU. On peut formaliser ces informations de la manière suivante :

$$\neg SK(\text{récursivité}), SK(\text{structure_cas}),$$

$$?SK(\text{récursivité_cas_d'arrêt_sur_atome}), MC(\text{connecteur_OU})$$

La représentation des connaissances de l'élève est donc constituée d'une liste de connaissances auxquelles sont attribuées l'un des trois prédicats.

Comme nous venons de le voir, par le biais du prédicat ?SK, le système représente des connaissances avec une certaine incertitude. Toutefois, cette incertitude ne porte que sur la possession ou non d'une connaissance prévue dans le monde décrit.

La logique multivaluée Pour pallier certaines limitations de la logique classique, des extensions à celles-ci ont été proposées. En effet, la logique multivaluée introduit des valeurs de vérité intermédiaires entre les extrêmes "Vrai" et "Faux". Ces valeurs intermédiaires vont permettre d'exprimer davantage de chose que dans la logique classique et notamment les notions d'"inconnu" ou d'"impossibilité". Néanmoins, ce qu'elles gagnent en expression, elles le perdent en clarté [Haton 91]. Effectivement, en proposant davantage de valeurs de vérité et donc de significations, on introduit une certaine subjectivité par exemple dans la détermination du nombre des valeurs de vérité et de leur signification.

Quelques TI, tels que SMIS [Ikeda 93] ou UMFE [Kass 87, Kass 88] utilisent ce formalisme pour la modélisation de l'élève. Nous nous proposons, ici encore, de présenter quelques uns de ces systèmes en donnant les particularités fonctionnelles.

Dans SMIS (*Student Modeling Inference System*), les concepteurs ont utilisé quatre valeurs de vérité qui sont "vrai" (l'élève croit que p est vrai), "faux" (l'élève croit que p est faux), "inconnu" (l'élève ne croit rien à propos de p) et "échec" (le profil ne statue rien sur la croyance en p de l'élève). Ce système utilise réellement la logique multivaluée et non une logique modale dans la mesure où les valeurs de vérité sont ici exclusives et ceci quelque soit les contextes considérés. Ces valeurs de vérité sont associées à l'ensemble des propositions constituant le modèle de l'expert. Au travers de ce formalisme et de l'utilisation des différentes valeurs de vérité, le système peut modéliser la connaissance par le sujet d'une connaissance ou d'une proposition issue du modèle de l'expert, que celle-ci soit juste ou non, mais aussi son absence et l'incapacité du système à prendre une décision, à inférer l'état de connaissance du sujet.

Quant à UMFE (*User-Modeling Front End*), l'objectif du profil de l'élève est d'adapter les interactions à l'élève en jouant le rôle d'"interface"; il traduit les requêtes émises par l'utilisateur à destination du système, ainsi que les réponses retournées par le système de telle manière que les messages échangés ne contiennent aucune information non maîtrisée par l'utilisateur. Il est donc nécessaire de modéliser les connaissances de l'élève en termes de connu/inconnu mais également en tenant compte de l'absence d'information. La logique multivaluée permet de modéliser cela au travers de trois valeurs de vérité qui sont "connu", "non-connu" et "aucune-information". La particularité de ce système prototypique non implanté est qu'il est théoriquement indépendant du domaine enseigné; c'est une sorte de module à incorporer dans un logiciel hôte afin de permettre une adaptation des interactions à l'utilisateur.

Le problème majeur des systèmes reposant sur les logiques classiques ou multivaluées est le traitement de données contradictoires. Ces dernières se rencontrent éventuellement lors des présentations successives d'un même problème (logique classique ou multivaluée ne permettent pas la prise en compte du temps), lors de l'intervention d'une même connaissance dans différents contextes Une solution a été énoncée pour résoudre ce problème; Murray [Murray 91] propose un système présentant en plus des valeurs de vérité "connu", "non-connu" et "aucune-information", une quatrième valeur notée "incertain" qui désigne les connaissances de l'apprenant pour lesquelles le tuteur a obtenu des informations contradictoires concernant leur maîtrise par l'élève.

Les logiques modales Pour modéliser les informations contradictoires dans le cas d'incohérences dans les différentes conceptions de l'élève et non pas dans le temps, dans le cas de l'acquisition de connaissances, Huang [Huang 94] mais aussi Self [Self 94] utilisent des opérateurs modaux. La particularité de la logique modale est de prendre en compte la notion de vérité contextuelle [Haton 91] qui s'exprime au travers de deux opérateurs modaux :

- \square qui est un *opérateur universel*; il correspond en fait à la notion de *nécessité*;
- \diamond un *opérateur existentiel* qui correspond à la notion de *possibilité*.

La sémantique associée aux formules $\square A$ et $\diamond A$ est fonction du contexte. Dans un contexte mettant l'accent sur l'aspect épistémique de la connaissance, $\square A$ signifie "A est su" et $\diamond A$ "A est peut être su" alors que lorsque le contexte prend en compte l'évolution du temps dans les valeurs de vérité, $\square A$ signifie "A sera toujours vrai" et $\diamond A$ "A sera vrai à un instant donné".

Au travers de l'utilisation de deux opérateurs modaux B_t qui représente la croyance du tuteur et B_s , la croyance de l'élève, Huang [Huang 94] modélise des méta-connaissances dans le but de montrer à l'élève ses propres inconsistances afin qu'il les identifie et agisse en conséquence. Il y a inconsistance lorsque l'on peut attribuer à une connaissance c une valeur de vérité "vrai" à la fois à $B_t(B_s(c))$ et à $B_t(B_s(\neg c))$.

La logique probabiliste. La connaissance de l'élève peut être représentée numériquement. Dans le tuteur WEST, au travers d'une méthodologie de modélisation dite *différentielle*, le profil de l'élève contient des données quantitatives. Avec cette approche différentielle, il s'agit de comparer la solution de l'élève à celle de l'expert. L'analyse des différences entre ces deux ensembles permet d'identifier les connaissances qui :

- ont été utilisées à la fois par l'élève et par l'expert (ce cas est noté par la suite $E1|Ex$);
- ont été utilisées par l'expert mais pas par l'élève ($\neg E1|Ex$);
- n'ont pas été utilisées par l'expert mais ont été utilisées par l'élève ($E1|\neg Ex$);
- n'ont été utilisées ni par l'élève ni par l'expert ($\neg E1|\neg Ex$).

Ce qui particularise cette approche est son aspect de manipulation de "connaissances contextuelles" : le profil de l'élève est élaboré tel un reflet des connaissances de l'élève en fonction de leur utilisation ou de leur non utilisation par l'expert. La modélisation différentielle des connaissances illustrée dans WUSOR III est schématisée sur la figure 2.5.

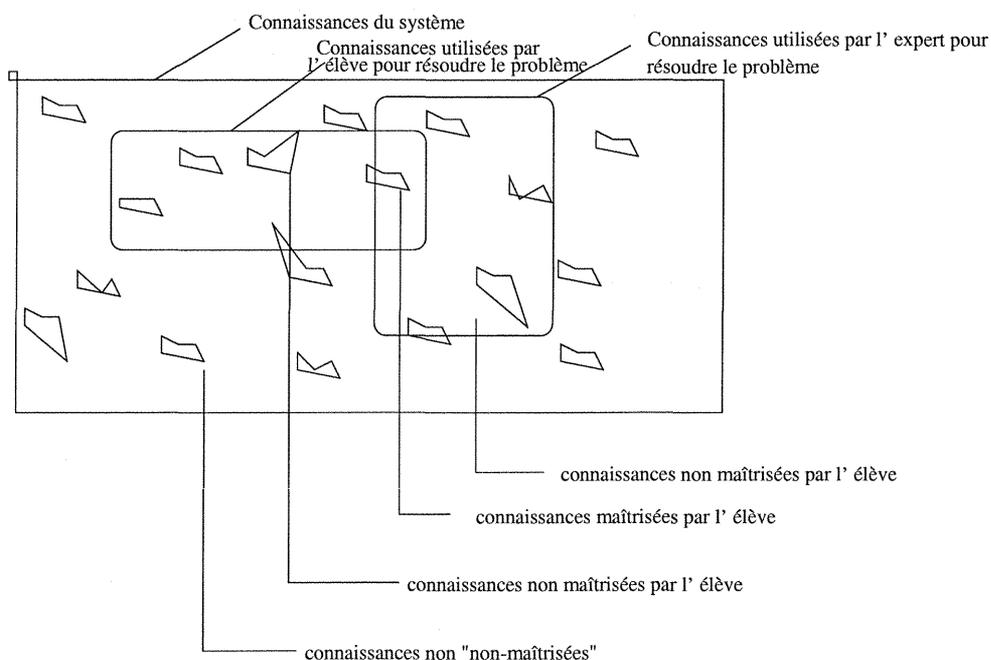


FIG. 2.5 – Modélisation différentielle

Comme pour tous systèmes de modélisation fondés sur une approche numérique de la représentation de la connaissance de l'apprenant et sur une modélisation différentielle, le formalisme utilisé correspond en fait à des probabilités conditionnelles. En fait, la notion de contexte s'apparente aux hypothèses énoncées dans la théorie des probabilités conditionnelles. Dans ce système, la connaissance experte est découpée en *entités* ("issue"). A chaque entité est associé le nombre de fois où l'élève l'a utilisée ou non dans chaque contexte [Wenger 87]. Le cardinal de cet ensemble de nombres dépend du type des entités. Chaque entité est représentée dans le profil de l'élève sous la forme d'un tableau (de la forme de celui présenté sur la figure 2.6).

Dans WEST, la connaissance experte est de cinq types différents qui sont regroupés, selon leur spécification par rapport au jeu, en trois classes. Celles-ci portent sur la connaissance spécifique au jeu, sur les connaissances relatives aux stratégies du jeu et sur la connaissance relative à l'arithmétique.

| Connaissance d'une entité donnée par l'élève | | | | |
|-------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Utilisation par l'expert | OUI | | NON | |
| | oui ($E1 Ex$) | non ($\neg E1 Ex$) | oui ($E1 \neg Ex$) | non ($\neg E1 \neg Ex$) |
| Utilisation par l'élève (Compteurs Associés) | | | | |
| Valeurs des compteurs | 1 | 4 | 1 | 2 |

FIG. 2.6 – Modélisation différentielle d'une entité

Grâce à cette technique, le système dispose au sein du profil de chaque élève de toutes les connaissances qui ont été utilisées et du dispositif permettant de décider si ces connaissances sont adéquates, c'est-à-dire conformes à l'utilisation experte, dans les différents contextes. Toutefois, le profil ne permet pas de dire si les connaissances du sujet sont correctes ou erronées. En effet, la seule conclusion que l'on peut tirer de ce profil est relative à l'adéquation entre l'utilisation des différentes entités manipulées par l'expert et celles manipulées par le sujet dans un contexte particulier. Ce dernier point n'est cependant pas dû au formalisme utilisé mais plutôt aux choix effectués par les concepteurs du système. En effet, dans le tuteur ET [Fum 92, Tasso 92], les concepteurs ont prévu comme catégories de compteurs les classes suivantes :

- entité de connaissance utilisée à bon escient (notée $E1|Ex$);
- entité de connaissance utilisée à mauvais escient (notée $E1|\neg Ex$);
- entité de connaissance manquante (notée $\neg E1|Ex$).

Ces trois catégories modélisent les connaissances bonnes, mauvaises et également les connaissances manquantes. Signalons néanmoins qu'une connaissance erronée est assimilée à une connaissance non utilisée par un expert dans un contexte donné ce qui n'est pas forcément valide dans l'absolu. De plus, par rapport à une modélisation différentielle classique, il manque l'information portant sur le nombre de fois où l'entité n'a été utilisée ni par l'expert ni par l'élève (notée $\neg E1|\neg Ex$). Pour relativiser ce dernier point, ce type d'information reste, dans le cadre d'un profil de l'élève, très peu informatif et justifie donc son "oubli". Il faut également souligner que la connaissance de l'élève est complétée par une description plus précise de ses erreurs. En effet, l'information "utilisée à mauvais escient" ne permet pas de déterminer l'erreur commise par l'élève. Les concepteurs ont donc recours à un catalogue d'erreurs auquel est associé, pour chaque erreur, le nombre de fois où l'élève a commis cette erreur. Par conséquent, même si le profil de l'utilisateur reste descriptif, le système dispose de deux niveaux d'analyse qui est le nombre de fois où les connaissances ont été utilisées à bon ou mauvais escient ou sont manquantes et, le type et le nombre de fois où les erreurs ont été commises.

Nous voyons donc qu'avec un même formalisme, des informations assez différentes peuvent être modélisées. Nous présentons maintenant un dernier système, FBM (*Feature-Based Modeling*) [Kumycz 92, Webb 93] encore différent des deux précédents. C'est un système qui se veut moins descriptif et plus complet que ceux que nous avons vu tout en ne considérant que le comportement de l'apprenant et les causes sous-jacentes de ce comportement. Ce dernier point n'est cependant pas une limite dans l'esprit des concepteurs de FBM⁷

Dans FBM, la connaissance de l'élève est représentée sous la forme d'un ensemble de règles de production qui symbolisent les traits caractéristiques du comportement de l'apprenant. Deux types de traits sont distingués ; ceux qui caractérisent le problème et ceux qui décrivent la solution de l'élève. Par exemple, pour une application au domaine de la soustraction, une solution proposée par l'élève peut être de la forme

$$\begin{array}{r} 7 \\ -3 \\ \hline =4 \end{array}$$

7. Cela permet selon les auteurs une abstraction sur le type de connaissances enseignées et donc une généralité du système pour des domaines variés tel que l'apprentissage du piano, de la soustraction élémentaire ou encore de l'unification "à la Prolog" comme cela a été réalisé.

dans laquelle les traits du problème et de l'action sont ceux présentés dans le tableau ci-dessous.

| Les traits du problème sont : | Les traits de l'action |
|-------------------------------|----------------------------------------------|
| bas < haut | le résultat est haut – bas |
| haut = 7 | le résultat est différent de 10 + bas – haut |
| bas = 3 | le résultat est bas + 1 |
| : | |

Le système construit dynamiquement des règles en associant des conjonctions de conditions, qui représentent le contexte dans lequel l'élève est placé, à une action qui est effectuée par ce dernier quand il résout le problème posé. Les conditions et les actions servant à construire les règles sont puisées dans un ensemble prédéfini de traits (features). Les règles ainsi construites permettent de modéliser l'élève en termes de relations entre les entrées et les sorties de ses processus cognitifs [Webb 93]. A ces associations sont attachées deux valeurs entières représentant le nombre de fois où l'élève a montré le comportement dénoté par l'association et le nombre de fois où l'élève a, dans le contexte décrit par l'association, exécuté des actions autres que celles représentées par la partie "action" de l'association. Une association entre un contexte C (une conjonction de traits décrivant le problème) et un action a , notée $C \rightarrow a$, est supposée représenter l'élève si et seulement si elle vérifie trois conditions ($\#$ indique le nombre d'associations d'un type donné qui ont été effectuées par l'élève) :

1. le nombre de comportements de l'élève correspondant à cette association doit être supérieur à un seuil minimum (généralement fixé à 3) : $\#(C \rightarrow a) > min_indice$;
2. le rapport entre le nombre d'exemples de comportements confirmant cette association et le nombre d'exemples concernant les comportements quelconques pour ce type de contexte doit être supérieur à un seuil minimum de précision (généralement fixé à 0.8) :

$$\frac{\#(C \rightarrow a)}{\#(C \rightarrow a) + \#(C \rightarrow \bar{a})} > min_precision$$

où \bar{a} représente toute action différente de a

3. il n'existe pas, dans le modèle de l'élève, d'association jugée représentative de l'élève qui relie une spécialisation C_s de C à une action de a .

La première condition permet de ne tenir compte que des associations consistantes, c'est-à-dire des associations représentatives de l'élève puisque plusieurs occurrences de cette association ont été rencontrées. La seconde condition permet au modèle de fonctionner malgré quelques données contradictoires (le seuil étant fixé ici à 20%). Cela permet de considérer qu'une connaissance est acquise même si on enregistre encore quelques erreurs qui sont alors considérées comme des fausses alarmes. La dernière condition inhibe certaines associations jugées trop générales en leur préférant des associations plus précises lorsque ces dernières indiquent un comportement contraire [Webb 93]. Cette dernière condition permet de suivre les changements de comportement de l'élève. En effet, on peut modéliser, dans un premier temps, le fait que l'élève réalise l'action a face à un contexte C , puis que l'élève, après avoir affiné sa connaissance par exemple, se rend compte qu'il faut agir différemment selon certaines caractéristiques qu'il n'avait pas prises en compte initialement.

Les principaux avantages de FBM relèvent donc à la fois de sa capacité représentationnelle des comportements de l'apprenant à partir des techniques simples d'apprentissage automatique utilisées mais aussi de sa robustesse face aux informations bruitées, et finalement, de suivre les changements dans le comportement de l'élève.

2.2.4 Un premier bilan

Comme nous l'avons vu au fil des systèmes informatiques et de la section 2.2, il existe autant de modèles de l'élève que de combinaisons entre la manière de déterminer les informations que l'on veut modéliser sur l'utilisateur, la manière de choisir un formalisme de représentation de ces informations et la manière d'élaborer les processus qui construisent un modèle de l'utilisateur.

Le modèle de l'élève contient un grand nombre d'informations. Celles-ci doivent, si l'on veut rester pertinent dans la modélisation, être avant tout utilisables ou en adéquation avec les autres modules du tuteur, que ce soit le module pédagogique, l'interface ou même le module de l'expert. Par conséquent, une directive est à respecter : il est totalement inutile de tenter de modéliser la totalité des observations sur l'élève. L'objectif est de représenter des connaissances utilisables par les autres modules et non d'établir un profil exact d'un élève, précis d'un point de vue psychologique [Self 88, Self 94]. Ce dernier point est d'ailleurs une tâche non seulement très difficile à réaliser mais aussi inutile d'un point de vue pratique dans la mesure où ce profil n'est qu'une structure de données destinée au module pédagogique. En effet, il n'est pas évident que le module pédagogique puisse utiliser un profil trop précis.

S'appuyant sur ce raisonnement, certains chercheurs sont arrivés à l'idée que les seules informations à mémoriser sur les erreurs s'énoncent en termes de non-application, ou d'application à mauvais escient de connaissances, puisque le but final du tuteur est que l'élève possède le plus exactement possible les connaissances figurant dans le modèle expert. Toutefois, pour certains domaines et certaines stratégies, il est toujours nécessaire de connaître les erreurs que l'élève fait et les causes de ces erreurs.

Certains des choix à effectuer au sujet du contenu du modèle de l'élève dépendent fortement du domaine d'enseignement considéré. Toutefois, même si le formalisme choisi dépend pour une grande part de la nature des informations considérées, ce n'est pas le seul facteur influençant le type de représentation ; un même formalisme peut être utilisé différemment et modéliser des informations variées.

Finalement, il apparaît que la modélisation des connaissances expertes présente fréquemment un formalisme différent de celle des connaissances de l'apprenant. En effet, les objectifs et les utilisations qu'en fait le système sont assez différents de la fonction du profil ; d'une part, dans le modèle des connaissances à acquérir, l'objectif est de représenter toutes les connaissances du domaine (ces connaissances sont établies) ainsi que leur mode d'utilisation, et d'autre part, dans le profil du sujet, les connaissances à modéliser sont souvent entachées d'une incertitude sur le comportement produit.

2.3 Bilan et ouverture

Dans l'approche des Sciences Humaines, la modélisation des connaissances s'articule autour des fonctionnalités des mémoires plurielles en mettant l'accent sur les variations interindividuelles et sur l'importance des connaissances antérieures qui conditionnent le processus développemental des acquisitions.

Pour les systèmes existants, le problème à résoudre relève de la question : que faut-il modéliser et sous quelle forme ?

L'attitude classiquement observée chez les concepteurs de tuteur est de modéliser les connaissances justes ou erronées au travers d'un formalisme adéquat à représenter les connaissances manipulées ainsi que l'imprécision attachée à l'estimation d'une réponse du sujet. L'imprécision porte dans les systèmes, de manière simplificatrice, sur le degré de confiance accordé à la connaissance qu'a le système sur l'état de connaissances dans lequel se trouve le sujet et non sur le degré de maîtrise d'une connaissance chez le sujet. Pour remédier à cela, nous proposons de modéliser les connaissances de référence ainsi que celles du sujet au travers d'un formalisme qui permet de tenir compte de l'aspect développemental de l'acquisition de chaque connaissance pour chaque sujet. Pour faciliter cet objectif, nous proposons d'uniformiser

ces deux mondes représentationnels.

Quant aux connaissances même à modéliser, il nous semble pertinent d'accorder des statuts identiques à chaque réponse du sujet, et ceci selon l'idée que chaque solution apportée à un problème par le sujet est un reflet de son état actuel de connaissances (nous développons ces points dans la section 6.4).

Ainsi, nous rejetons la notion de "bruit" à laquelle les tuteurs font appel pour justifier le rejet de réponses ponctuelles dissonantes ou divergentes des réponses précédemment obtenues. A notre sens, cette notion est contraire au principe de développement des connaissances. Par conséquent, nous mettons l'accent sur l'aspect développemental de la modélisation de la connaissance tant au travers du formalisme que sur les méthodes utilisées pour modéliser les réponses des sujets.

Chapitre 3

Acquérir des connaissances, oui mais comment ?

Dans l'apprentissage ou l'acquisition de connaissances, les facteurs les plus importants concernent l'apprenant et plus particulièrement les connaissances antérieures qu'il active, ainsi que les activités cognitives de traitement de l'information qu'il déploie. Les connaissances interviennent dans la construction d'une représentation momentanée de la situation permettant de donner une signification à ses éléments, et dans la recherche d'informations utiles pour élaborer une réponse aux problèmes rencontrés. Les activités de l'apprenant, et en particulier les inférences et les analogies qui conduisent à un changement de la représentation momentanée de la situation, déterminent de façon très stricte ce qui sera appris. L'intervention de ces facteurs est modulée par le type d'apprentissage.

Les deux prochaines sections reprennent et développent les aspects de la construction de connaissances sous l'angle de la résolution de problèmes et présentent les deux types d'apprentissage. Puis dans la troisième section, nous envisageons le problème de l'acquisition de connaissances à l'aide d'un tuteur informatique. Nous nous penchons alors sur l'existant et ses limites.

3.1 Mécanismes et types d'apprentissage

3.1.1 Les mécanismes de l'apprentissage

Quelle que soit la conception théorique adoptée au niveau de l'apprentissage, une spécification des mécanismes supposés intervenir dans les changements de la compétence d'un individu doit être proposée. Contrairement aux théories béhavioristes, qui tentent généralement d'expliquer les apprentissages par un seul mécanisme, la plupart des théories cognitivistes en invoquent plusieurs [Piaget 74].

Bien qu'il n'y ait pas de consensus sur la liste des mécanismes, plusieurs d'entre eux sont souvent invoqués. On peut les répartir en trois classes que nous présentons brièvement dans les paragraphes suivants.

Des modifications quantitatives

Cette première classe concerne les modifications quantitatives de certains paramètres de connaissances déjà constitués. Elles sont souvent désignées comme des modifications de la "force" d'un item lexical, d'une règle d'action, . . . Une augmentation est attribuée soit aux utilisations répétées de l'un de ces éléments, soit aux utilisations renforcées par la réussite.

La sélection et la mémorisation

Cette seconde classe de mécanismes concerne la sélection et la mémorisation de certains faits constatés ou communiqués par autrui. Tous les faits perçus ne sont pas mémorisés. Les études expérimentales montrent que leur sélection dépend de critères multiples, comme leur pertinence par rapport aux buts poursuivis, leur caractère inattendu, les réactions d'éveil émotionnel qu'ils suscitent . . . Une autre restriction provient de la limitation de la capacité de la mémoire de travail, qui peut imposer une sélection supplémentaire parmi les faits intéressants. Dans plusieurs modèles, la mémorisation des informations nouvelles est également fonction de leur relation avec d'autres faits déjà connus.

Les activités mentales

Cette classe englobe les différents groupements d'activités mentales permettant d'engendrer de nouvelles informations à partir de celles déjà connues. Ces mécanismes peuvent conduire à rechercher des informations supplémentaires parmi celles qui sont fournies par la situation mais, en pareil cas, ce qui est fondamental, c'est leur transformation et non leur mémorisation. Les mécanismes les plus souvent invoqués sont l'analogie, la formulation et le test d'hypothèse, l'induction et finalement, la généralisation.

3.1.2 Méthodes ou types d'apprentissage

Deux types d'apprentissage sont classiquement distingués :

- l'apprentissage par instruction ;
- l'apprentissage par l'action et la découverte à partir de situations d'exploration et de résolution de problème.

Dans le cas de l'apprentissage par instruction, les connaissances sont présentées de manière générale et sont organisées à partir d'une logique propre (qui est celle de la cohérence entre les informations) et de l'intégration aux connaissances déjà possédées.

Dans le cas de l'apprentissage par l'action, les connaissances sont construites progressivement à partir du contexte particulier de la tâche ; ce sont des connaissances spécifiques, organisées en fonction des problèmes rencontrés. Ce sont par là des connaissances orientées vers l'utilisation et la mise en œuvre dans des contextes spécifiques.

Ainsi, il y a deux dimensions qui distinguent l'apprentissage par la découverte et l'apprentissage par instruction qui sont la dimension particulier/général et la dimension logique interne d'organisation/logique d'utilisation. Ces deux dimensions ne sont pas indépendantes.

La première concerne le choix du degré de généralité auquel exposer les concepts et les relations. Un haut degré de généralité présente l'avantage d'être économique et de rattacher plus facilement les connaissances à faire acquérir aux connaissances existantes. Il faut que l'apprenant soit capable de produire spontanément une représentation concrète des énoncés généraux pour être à même de comprendre. Les exemples tentent de remédier à cette difficulté dans la mesure où ils particularisent l'énoncé. Toutefois, un exposé général, accompagné ou non d'un exemple, suit le plus souvent une logique qui est celle de l'organisation interne des connaissances. Les exemples ne sont que des illustrations ; ce ne sont pas des applications des connaissances à la résolution d'un problème spécifique. Ainsi, la difficulté de ce type d'apprentissage est que les connaissances semblent mémorisées mais ne sont pas mises en œuvre dans des contextes où elles seraient utiles. On a, par ailleurs, souvent fait la remarque que les élèves n'utilisent pas les connaissances générales et abstraites qu'ils possèdent : l'explication la plus courante de ce phénomène est que ces connaissances ne sont pas réellement assimilées. La difficulté est en fait

de transformer (en procédures applicables à des problèmes concrets) des connaissances qui sont organisées en mémoire selon une logique cohérente interne et non en fonction des types de problèmes qu'elles peuvent permettre de résoudre.

La démarche inverse est réalisée dans l'apprentissage par l'action et la découverte. On cherche la solution de problèmes spécifiques et, à partir de là, on construit, par des procédures inductives, des connaissances sur la situation. Celles-ci sont structurées par les problèmes à résoudre. De ces connaissances concrètes, on peut déduire des procédures plus générales, valables pour des classes de situations. A partir de l'analyse de ces procédures, des propriétés relationnelles de ces situations peuvent être construites. Celles-ci permettent de déduire les procédures et par là, expliquent leur bien-fondé. Le savoir procédural est construit d'abord, le savoir relationnel ensuite.

Dans l'apprentissage par l'action, les progrès sont tributaires en grande partie de la valeur informationnelle de la rétroaction. L'information minimale est l'indication d'une réussite ou d'un échec dans la réalisation de l'objectif poursuivi. L'apprenant peut errer longtemps avant de repérer en quel point il y a eu erreur, lorsque la tâche nécessite une longue procédure et que l'indication sur la réussite survient seulement à la fin de celle-ci. Il se trouve aussi démuné pour rectifier son action lorsque le message d'erreur ne spécifie pas la nature de celle-ci (par exemple, en algèbre, erreur de calcul arithmétique, erreur stratégique consistant à factoriser au lieu de développer, ...).

Nos propositions, même si elles empruntent à divers moments des principes de l'apprentissage par instruction, reposent essentiellement sur un apprentissage de type action-découverte. Nous axons notre développement du processus d'acquisition dans cette optique. C'est la raison pour laquelle, nous traitons dans la section suivante, l'acquisition des connaissances comme une activité de résolution de problème.

3.2 L'acquisition de connaissances ou une activité de résolution de problème

Le processus d'acquisition de connaissances est à distinguer du simple processus de mémorisation. Dans le cas de l'acquisition, le processus relève d'une activité volontaire et consciente de la part du sujet. L'acquisition de connaissances est toujours à analyser en fonction d'un but (c'est une activité finalisée), alors que la mémorisation en tant que processus peut être fortuite et inconsciente. Dans le cadre d'un enseignement et de l'éducation dans lequel nous nous plaçons, nous n'envisageons que l'aspect de l'activité consciente et volontaire du sujet, l'acquisition des connaissances.

L'apprentissage ou l'acquisition de connaissances, dans le sens précédemment proposé, est à rapprocher d'une activité de résolution de problème dans lequel l'état initial correspond à l'état actuel de la connaissance de l'élève et l'état final à l'état de connaissances qu'il atteint après l'enseignement, après avoir exercé une activité spécifique.

Il y a acquisition de connaissances lorsqu'une solution ou une partie de la solution permet une amélioration de l'efficacité par rapport aux solutions précédemment essayées. Toutefois, celle-ci ne se réduit pas uniquement en termes de gain quantitatif. En effet, une acquisition peut être l'utilisation préférentielle d'une règle plutôt qu'une autre dans un contexte donné.

L'acquisition se compose de la connaissance proposée dans le contexte donné ainsi que de l'impact qu'elle a eu sur la solution. Cet impact est mesuré, évalué en fonction de l'objectif à atteindre. En fait, cette estimation a pour fonction de répondre à la question : "la connaissance utilisée permet-elle dans ce problème de se rapprocher ou d'atteindre l'objectif, l'état final, et ceci avec quel coût?"

Nous distinguons, dans cet exposé, l'état de connaissance idéal qui est celui dans lequel le tuteur, humain ou non, veut que l'élève arrive de l'état final qui est celui atteint par le sujet. Cette distinction n'est pas superflue. Elle reflète deux points de vue différents qui sont celui du pédagogue ou expert

et celui de l'élève. L'objectif d'un apprentissage, quel qu'il soit, étant bien entendu d'unifier ces deux mondes. Toutefois, étant donné le décalage qu'il existe entre l'idéal du pédagogue et le réel de l'élève, il est indispensable d'en tenir compte dans un processus d'apprentissage, et donc de les distinguer. Dans la suite de notre exposé, nous adoptons le point de vue de l'élève, de celui qui acquiert une connaissance.

3.2.1 Une activité finalisée

Comme nous l'avons précédemment souligné, l'acquisition de connaissances est une activité finalisée de construction de représentations cohérentes d'un ensemble d'éléments. La finalité correspond à la possibilité pour le sujet de résoudre un problème d'une manière plus adaptée que celle mise en œuvre avant l'acquisition. Par exemple, un aspect essentiel de l'acquisition de connaissances dans un problème de mathématique consiste à construire des représentations différentes des contextes dans lesquels s'appliquent les connaissances. La cohérence est obtenue par l'intégration de tous les éléments pertinents à cette finalité dans une même structure. Par conséquent, toute activité d'acquisition implique une activité d'évaluation de la représentation évoquée ou élaborée, du double point de vue de la cohérence et de la finalité.

3.2.2 L'évaluation : facteur central de l'acquisition

Toute évaluation est à considérer par rapport à un objectif. Dans le cas d'une acquisition de connaissance, l'évaluation est le média qui permet au sujet de décider si la cible est atteinte. L'évaluation consiste à déterminer une distance ou un écart entre une réponse proposée et la réponse attendue ou recherchée. En aucune manière, elle ne permet de dire si la réponse est correcte. Pour illustrer ce point, nous prenons l'exemple de l'apprentissage d'une langue étrangère. Si l'objectif du sujet est de se faire comprendre dans des activités quotidiennes telles que demander son chemin, acheter le pain . . . , l'évaluation porte sur la compréhension des questions et des réponses chez les différents interlocuteurs qui lui permettent alors d'atteindre son but qui est l'obtention de pain L'objectif peut être atteint, et l'évaluation satisfaisante, malgré une maîtrise parcellaire de la langue, une grammaire et un accent déplorable. L'évaluation peut être définie comme un processus relatif à un objectif à atteindre dans une situation, pour un sujet donné qui estime l'écart entre la réponse attendue et la réponse fournie. L'évaluation revêt, sous certains angles, un caractère relatif. En effet, deux solutions successives sont estimées sous l'éclairage simultané de l'objectif poursuivi et du gain en efficacité qu'elles permettent ; c'est-à-dire que l'évaluation va conduire à hiérarchiser les solutions proposées à un même problème.

Pour un même sujet, sur une même tâche, l'estimation peut également varier en fonction du degré de granularité ou des critères d'évaluation retenus. En effet, elle peut porter sur la réponse finale comme dans l'exemple précédent, et/ou sur des réponses intermédiaires. Si l'on prend une réponse dans le cadre d'un enseignement de la résolution d'équation, la réponse finale peut être erronée mais différentes étapes dans la résolution peuvent être correctes. En ce qui concerne le choix du critère d'évaluation, il conditionne fortement l'évaluation et la satisfaction pour une réponse donnée. Ainsi une réponse peut être évaluée différemment si l'on considère simultanément ou successivement différents critères. Dans ce cadre, l'obtention d'un profil de l'élève et, par glissement, les évaluations résultent de la catégorisation des objets ou des connaissances sur des échelles correspondant à chacun des critères à prendre en compte, puis en la combinaison pondérée des évaluations obtenues pour chacun de ces critères.

L'évaluation peut être interne et externe au sujet, c'est-à-dire relever d'une source extérieure ou propre au sujet lui-même. Le sujet peut estimer avoir atteint son but alors qu'une source externe, un tuteur par exemple, ne propose pas ce type d'évaluation. Cela se produit uniquement lorsque les deux

sources ont fixé des objectifs différents. Il convient pour assurer la cohérence dans les évaluations de poser au préalable, explicitement, les objectifs poursuivis. Dans le cadre d'une pluralité des sources évaluatives, deux types de questions se posent : A quelle source le sujet va-t-il adhérer ? Quels vont être les impacts de ces différentes évaluations ?

Pour répondre à ces interrogations, deux aspects doivent être envisagés :

- le statut de la source ;
- le délai de rétroaction entre la réponse et le résultat de l'évaluation.

Pour le premier point, nous faisons appel à certains travaux anciens de psychologie sociale tels que les expériences de Milgram [Milgram 61]. Ces travaux mettent en évidence le rôle du statut de l'individu dans l'obéissance et l'acceptation d'un comportement, d'une réponse. Ainsi, plus le statut de l'individu *A* est supérieur à celui de l'individu *B*, plus l'individu *B* aura tendance à adhérer au point de vue de *A*. Par analogie, lorsque l'évaluation d'une réponse est produite par un professeur ou un tuteur, elle a davantage de poids et d'impact sur l'élève que si celle-ci émane d'un de ses pairs, selon les conclusions expérimentales énoncées précédemment.

Quant au délai de rétroaction, il a donné lieu à de nombreux travaux, notamment dans les conceptions behavioristes. Pour que la rétroaction ait un effet sur le comportement visé, il faut que le délai entre la réponse et son effet soit acceptable. Plus la rétroaction est éloignée du comportement, plus son efficacité est restreinte.

3.3 Existant et difficultés dans les tutoriels

3.3.1 Évaluation et guidage dans un système informatique d'apprentissage

Dans les systèmes informatiques, lorsque l'on veut adapter au mieux l'interaction système-utilisateur, il faut comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 à la page 31 constituer un modèle de l'utilisateur (un profil lorsque celui-ci est instancié) le plus en adéquation avec l'état présent des connaissances de l'utilisateur et qui soit utilisable par les autres modules. Par conséquent, il faut un modèle évolutif en fonction des modifications de l'état cognitif de son utilisateur. Pour ce faire, le système doit être en mesure de mettre en place une évaluation des productions de l'utilisateur qui permet la prise en considération des nouvelles données. Cette dernière relève de deux tâches complémentaires qui sont la détermination des processus d'acquisition de l'information sur l'élève, et la détermination des mécanismes de synthèse de ces nouvelles informations avec les informations antérieures. Une fois cette première étape réalisée, la seconde étape, celle que nous visons dans les EIAO, peut enfin se mettre en place : adapter le retour proposé à l'élève, guider l'apprenant. Nous verrons successivement, au sein de cette section, comment ces deux étapes sont abordées dans les différents systèmes ainsi que les difficultés liées à celles-ci.

Première étape : l'acquisition de nouvelles connaissances

Lorsque l'on pense "processus d'acquisition", on parle *diagnostic*, par analogie avec les systèmes d'acquisition d'informations sur les systèmes mécaniques. Pour nous, comme pour Danna [Danna 97], nous restreignons l'utilisation de cette notion de diagnostic uniquement au processus même d'acquisition contrairement à de nombreux auteurs qui incluent également dans le diagnostic la notion de synthèse de ces informations. Il nous a semblé pertinent de distinguer ces deux processus dans la mesure où l'évaluation d'un comportement n'induit pas forcément une modification du profil de l'utilisateur. En effet, lorsque le système diagnostique une inconsistance pour une connaissance, de nombreux systèmes n'intègrent pas le résultat du diagnostic à l'état actuel du profil de l'utilisateur.

Lorsque l'on se penche sur les méthodes de diagnostic mises en oeuvre dans les tuteurs actuels, on découvre une fois encore une grande diversité. Pour s'y retrouver, nous proposons quelques critères de classification issus d'une taxonomie réalisée principalement par Kass [Kass 87] :

- les sources d'information peuvent être :
 - *implicites* dans un *diagnostic inférentiel*, c'est-à-dire que le diagnostic est entièrement réalisé en s'appuyant sur des observations ;
 - *explicites* dans un *diagnostic interactif*, c'est-à-dire que le diagnostic est réalisé à partir de questions posées directement à l'élève. Pour réaliser le diagnostic, le système peut donc poser directement des questions afin de lever les ambiguïtés comme dans WHY ou même d'établir totalement le diagnostic. ACE [Wenger 87, Kass 87] est un des rares systèmes qui soit purement interactif au niveau du système de diagnostic.
- la globalité des données fournies au diagnostiqueur
 - *incrémental* lorsque le tuteur affine le profil de l'utilisateur au fur et à mesure des interactions en analysant le comportement de l'élève ;
 - *global* lorsque le système attend d'avoir les réponses à tous les exercices avant de commencer son diagnostic ;
- le principe d'acquisition des informations :
 - *basé sur les observations*. Le processus d'acquisition d'informations sur l'apprenant traite les données en provenance des différentes sources disponibles et en infère des informations sur l'élève à partir uniquement des observations ;
 - *basé sur la connaissance stéréotype*. Un ensemble prédéfini d'informations non primitives permet d'élaborer le contenu du modèle de l'apprenant, à partir du comportement de l'élève. Le profil final de l'élève est donc un assemblage de briques prédéfinies ;
- le moment de l'acquisition :
 - *on-line* c'est-à-dire que le diagnostic est réalisé au moment où l'élève utilise le système ;
 - *off-line* : le diagnostic est différé, c'est-à-dire que l'élève fournit ses réponses qui sont enregistrées par le tuteur. Puis, sans contact avec l'apprenant ayant utilisé le didacticiel, le diagnostiqueur analyse les réponses et en infère des informations. Le résultat du diagnostic élaboré peut alors être utilisé par un tuteur humain afin de paramétrer le tutoriel pour une utilisation future par cet élève.

Pour chacun de ces critères, le choix de l'un ou l'autre élément de l'alternative est important ; un concepteur de tuteur qui veut maximiser l'individualisation du système dans l'acquisition des informations, choisit un diagnostic inférentiel, incrémental, basé sur les observations et finalement, on-line.

Pour optimiser l'individualisation de l'interaction, le système doit posséder un profil en adéquation avec les autres modules mais également reflétant l'état cognitif actuel du sujet. Dans l'optique de refléter l'état du sujet, les données recueillies doivent être objectives et complètes ; d'une part, le diagnostic s'appuie sur les observations du comportement (le diagnostic inférentiel) et non sur une interprétation de celui-ci par le sujet lui-même qui n'est pas le plus apte à évaluer sa performance ou à justifier après coup son comportement ne serait-ce que pour des problèmes de compréhension de terminologie des questions et d'autre part, le diagnostic ne doit pas avoir été pré-construit pour tous les utilisateurs du système dans lequel, le travail réel consiste à allouer un élément de diagnostic pouvant plus ou moins convenir à un comportement.

Quant à la nécessité que le profil soit valide pour la situation présente, il est indispensable que l'élaboration du profil soit faite en temps réel, c'est-à-dire durant les interactions avec l'utilisateur et non de manière différée, afin que chaque modification de comportement et éventuellement d'état cognitif de l'élève soit prise en compte dans les interactions présentes et à venir, et permette ainsi de réagir à tout

instant. Par conséquent, un diagnostic incrémental et on-line est préférable dans l'élaboration d'un tel système. Les choix diagnostics que nous avons effectués (un diagnostic implicite, incrémental, basé sur les observations et on-line) imposent le maximum de contraintes dans la conception d'un système. Nous nous focalisons sur ces diagnostics ainsi que sur les contraintes et difficultés qu'ils soulèvent.

Contraintes et difficultés Lorsque le système recueille des données sur le comportement du sujet, sa première tâche est de déterminer les connaissances qui sous-tendent le comportement ou la réponse du sujet, que ce soit des connaissances correctes ou erronées.

L'identification des connaissances. Il est nécessaire d'identifier les connaissances⁸ qui permettent d'expliquer le comportement de l'élève. Ces informations sur l'état cognitif de l'élève expriment le fait que l'élève possède des connaissances (crédit) ou non (débit) et que ces connaissances sont celles ou non utilisées par l'expert. La difficulté ici est qu'il est impossible de prévoir l'intégralité des réponses de l'élève puisque potentiellement, il existe une diversité quasiment infinie des comportements d'un individu, qui plus est, de plusieurs individus. Il faut donc écarter la solution qui serait de déterminer un diagnostic basé sur des connaissances *a priori de l'élève*.

Une solution de rechange est de restreindre la vue qu'a le système sur le comportement de l'élève afin de limiter le nombre des réponses possibles. Toutefois, cette restriction a des conséquences non négligeables : le système ne peut plus adapter précisément son comportement à l'élève puisqu'il ne dispose plus d'informations suffisamment précises. Il ne peut plus remplir son rôle de base qui est d'individualiser les interactions système-sujet.

L'identification des erreurs. La difficulté d'identification des connaissances se retrouve au niveau de celle des erreurs. Comment faire pour parvenir à constituer un système qui permette d'acquérir des informations fiables à partir des réponses incorrectes, et ceci pour le plus grand nombre d'erreurs possibles? La solution généralement envisagée est d'avoir recours à une théorie des erreurs relative au domaine enseigné. Toutefois, cela n'est pas la solution optimale ; cette théorie n'existe pas forcément dans tous les domaines. Il faut alors la construire ce qui requiert beaucoup de temps et qui ne présente pas forcément toutes les garanties : comment être sûr que cette théorie est exhaustive, recouvre toutes les malrègles applicables par un apprenant?

Lorsque le diagnostiqueur cherche une combinaison d'un certain nombre d'erreurs simultanées qui puisse expliquer le comportement de l'élève, le risque d'explosion combinatoire est fréquent. Certains systèmes, afin de contenir ce risque, proposent de limiter la combinaison à un certain nombre d'erreurs co-occurentes [Wenger 87].

Le phénomène d'explosion combinatoire est accru lorsque le diagnostiqueur tente de reconstruire lui-même la connaissance utilisée par l'élève. Si tous les concepteurs de tuteurs doivent tenir compte de ce problème, ce dernier est réellement une calamité pour ceux qui ont choisi de réaliser le diagnostic on-line. Effectivement, dans ces systèmes, les contraintes de temps sont une donnée importante ; si l'élève doit attendre un certain laps de temps que le système lui rende la main, il y a de fortes chances que l'élève se disperse rapidement, et n'attache ainsi pas suffisamment d'attention à son activité.

Le problème de l'explosion combinatoire se pose également lorsque le diagnostiqueur tente d'identifier le processus de résolution de problèmes que l'élève a suivi, lorsque cette identification est réalisée en recherchant dans un espace de processus possibles (espace problème).

8. On parle également d'assignation de crédit/débit (credit/blame assignment [Wenger 87])

Les méthodes de diagnostic En prenant pour référence l'un des deux critères d'analyse⁹ utilisé par VanLehn [Vanlehn 88], on peut s'intéresser à la granularité avec laquelle le processus de résolution de problème peut être observé par le système. Nous proposons afin d'illustrer ce dernier point le schéma 3.1 issu de Wenger [Wenger 87]. Sur cette figure, nous voyons que deux activités sont à considérer : les activités observables qui sont les comportements ou réponses du sujet et les activités non observables. Ces dernières sont produites à partir de la confrontation d'un état cognitif particulier et d'un problème. De cette confrontation, il ressort, après mise en œuvre d'un moteur de raisonnement (assimilable au niveau du principe à un moteur d'inférence), un plan d'action. Ce plan est décomposable en étapes cognitives. Il est nécessaire de distinguer les étapes cognitives qui sont non observables des étapes de la solution du sujet. Une catégorisation des méthodes de diagnostic peut être définie en fonction de la qualité et de la quantité des données d'entrée. Trois classes sont à considérer : les états mentaux qui sont non observables, les états intermédiaires qui font reposer le diagnostic sur la solution terminale du sujet ainsi que sur les étapes observables de son comportement et les états finaux qui se basent uniquement sur la solution terminale proposée au problème.

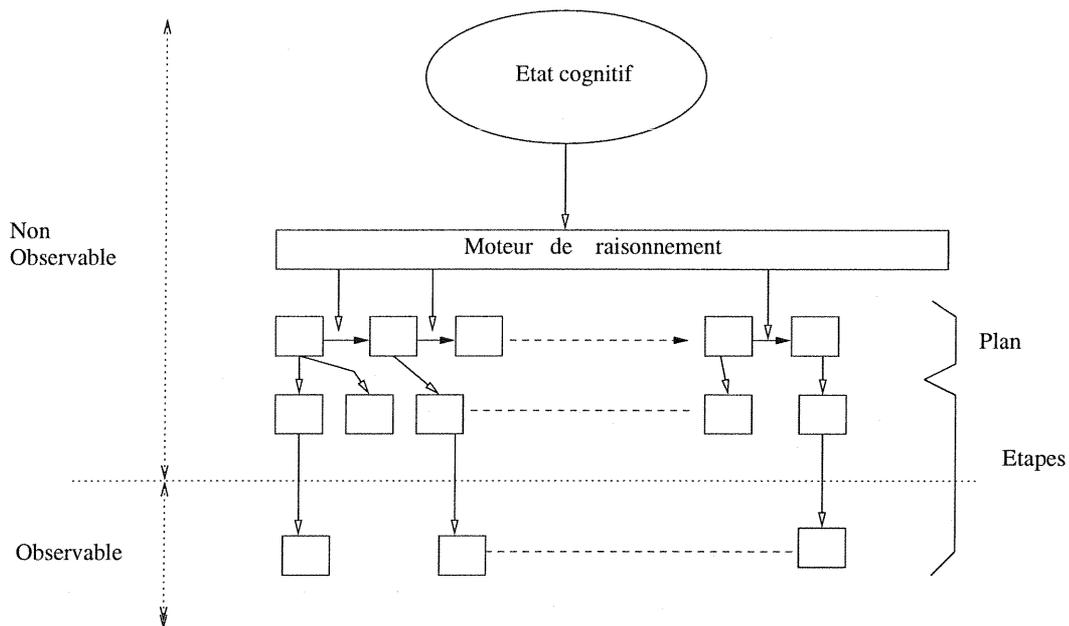


FIG. 3.1 – Le processus de résolution de problème selon Wenger [Wenger 87]

Les états mentaux. Dans cet état, VanLehn [Vanlehn 88] décrit un niveau d'observation dans lequel le tuteur dispose de tous les états effectués par l'élève, même les étapes réalisées mentalement par celui-ci. En réalité, cette catégorie est idéale et aucun tuteur ne peut prétendre accéder à ce niveau d'observation, bien que certains systèmes arrivent à apercevoir certaines étapes mentales. Par exemple, grâce aux menus de construction d'un programme, le tuteur LISP TUTOR [Anderson 85a] peut suivre le plan que l'élève applique pour concevoir son programme. En effet, si les actions élémentaires ne correspondent pas toujours à des états mentaux de l'élève, le fait d'analyser chaque pas élémentaire de la résolution (utilisation d'un *modèle pas à pas*) rapproche de cette situation. Ainsi dans ce système, chaque s-expression que l'étudiant écrit est immédiatement analysée. Cette contrainte majeure suppose que l'analyse initiale de la tâche a été suffisamment développée pour qu'à chaque étape élémentaire

9. L'autre critère s'appuie sur le type de représentations utilisé dans le tuteur, principalement procédural *versus* déclaratif.

toutes les possibilités aient été prévues afin que l'élève puisse exprimer assez librement ce qu'il souhaite si l'interface permet l'expression de toutes ces possibilités sans trop de complexité.

Il faut également déterminer la manière dont on incite l'étudiant à introduire des erreurs sans pour autant les lui suggérer. En pratique, cette situation induit un style d'interactions très contraignant pour l'étudiant.

La même technique est employée dans GEOMETRY TUTOR [Anderson 85a]. Dans ce tuteur qui a pour objectif l'apprentissage de la démonstration, les pas de preuve sont constitués de règles que l'élève choisit d'appliquer. L'analyse de la réponse de l'élève se fait par comparaison avec le modèle idéal (la bonne solution) assorti d'un modèle erroné. Le système apparie la règle appliquée par l'élève à l'une des règles des modèles. La critique que nous pouvons faire à ce mode de fonctionnement [Guin 91] porte sur les contraintes imposées à l'élève ; l'élève ne peut proposer une démonstration correcte que si celle-ci a été prévue dans le modèle. Après un petit nombre d'essais, l'élève est guidé vers la meilleure règle à appliquer. Il en résulte un modèle d'apprentissage très guidé et très structuré, qui ne porte en pratique que sur des connaissances procédurales.

Les états finaux Dans cette catégorie, le système ne voit aucune étape du processus de résolution du problème qui a été suivi par l'élève. Il ne voit que la solution que l'élève propose pour le problème qui lui a été soumis, c'est-à-dire l'étape finale. Peu de système utilise cette méthode ; on peut néanmoins citer PROUST [Soloway 85], DEBUGGY, QUIZ [Labat 90]. Ces tuteurs ne connaissent que la réponse à la question posée même si cette réponse est un ensemble structuré comme dans PROUST. Notons également que cette catégorie inclut des travaux sur un diagnostic différé, indépendant de toute interaction. Toutefois, les techniques de diagnostic utilisées par ces différents systèmes sont notables et nous choisissons de les présenter, ainsi que de les illustrer par des exemples de tuteurs :

- **Diagnostic : "générer et tester."** Cette technique est utilisée dans le système DEBUGGY afin de pouvoir reconstituer les combinaisons de plusieurs erreurs dans des résultats de soustraction. Cette méthode consiste à générer un ensemble de candidats pour ensuite les tester un par un afin de déterminer celui ou ceux qui conviennent (un schéma extrait de [Danna 97] est proposé sur la figure 3.2).¹⁰

Dans le cas de la modélisation de l'apprenant, l'algorithme de diagnostic basé sur cette méthode peut être appliqué de la manière suivante :

1. génération d'un ensemble de diagnostics candidats à partir d'heuristiques de diagnostic généralement *ad hoc* ;
2. calculs des modèles de l'élève correspondant à ces diagnostics ;
3. détermination des réponses que chaque modèle de l'élève prédit ;
4. comparaison des prédictions avec la réponse réelle de l'élève.

Le diagnostic associé au modèle de l'élève qui permet de prédire le mieux le comportement de l'élève est conservé.

Cette technique a l'avantage d'être applicable quelque soit connaissance considérée. Cependant, elle nécessite des heuristiques dépendantes du domaine afin d'augmenter la rapidité du diagnostic, sous peine d'être peu efficace à cause de l'explosion combinatoire inhérente à la phase de génération. Dans le système DEBUGGY, une liste des erreurs fréquentes difficiles à identifier est utilisée et permet ainsi de diagnostiquer jusqu'à quatre erreurs co-occurentes [Kass 88].

10. Cette technique est à rapprocher fortement de la notion d'espace problème de Newell et Simon [Newell 72].

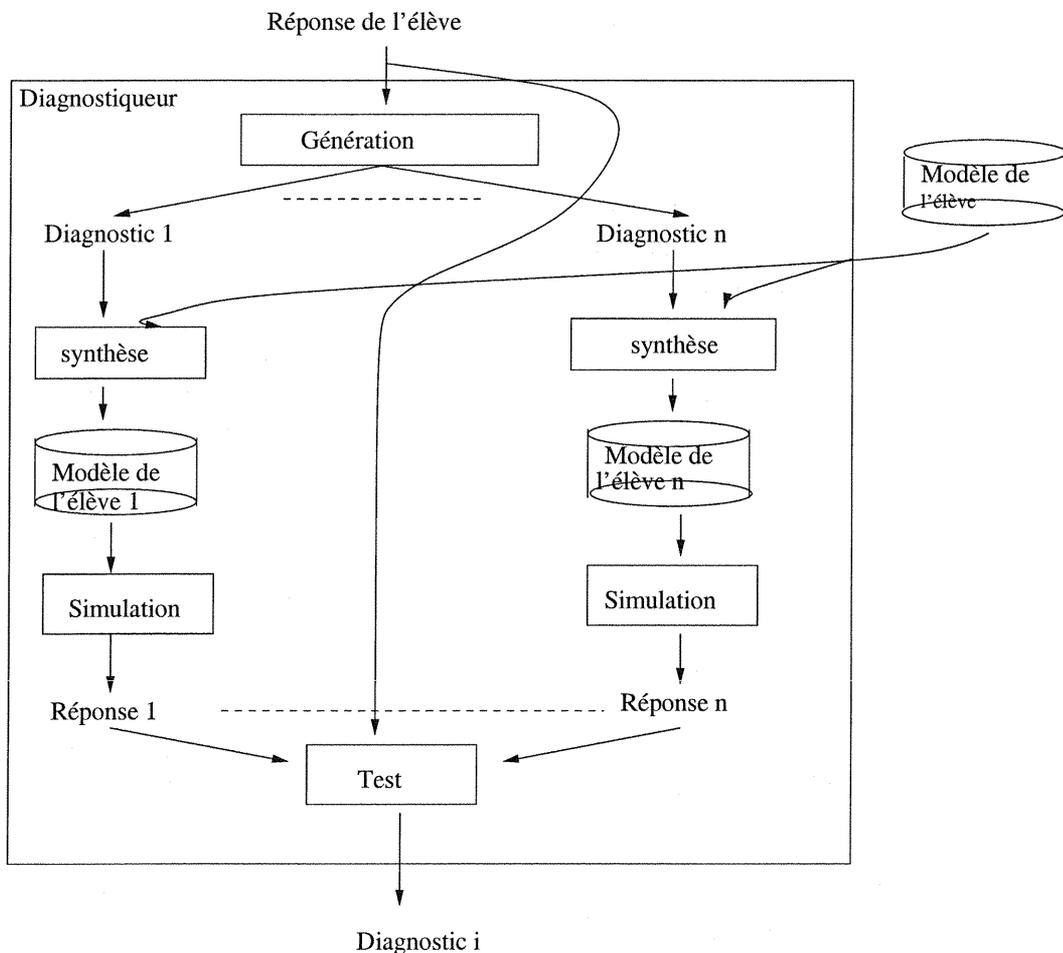


FIG. 3.2 – Le diagnostic générer et tester

- **Diagnostic : un arbre de décision.** Le principe de cette technique consiste à construire, préalablement à toute utilisation du tuteur, l'espace des processus de résolution de problèmes possibles sous forme d'un arbre dont les feuilles sont toutes les réponses imaginables. La réponse de l'élève donne ainsi directement les étapes intermédiaires. Cette technique est applicable dans le cas où seule l'étape finale est visible par le tuteur. Une fois les étapes intermédiaires déterminées, la méthode par traçage de modèle (voir ci-dessous à la page 61) est souvent appliquée.

L'avantage pratique de cette technique est qu'elle permet un diagnostic relativement rapide, surtout dans le cas des combinaisons d'erreurs puisque ces combinaisons sont calculées hors ligne. Elle constitue un palliatif trivial aux problèmes liés à l'explosion combinatoire lorsqu'on cherche à définir un diagnostiqueur en ligne. En effet, le seul travail restant à faire en cours de session est de reconnaître la solution de l'élève parmi celles générées hors ligne. Cependant, l'explosion combinatoire reste un inconvénient pratique majeur lors de l'élaboration hors ligne des différentes solutions. Un autre problème concerne le cas où le diagnostiqueur détermine plusieurs chemins possibles.

Les états intermédiaires. Ici, le tuteur voit toutes les étapes observables suivies par l'élève lorsqu'il résout le problème. Toutefois, le système ne dispose pas d'informations, d'observations sur les prises de décisions stratégiques du sujet et sur les sous-butts qui sous-tendent les différentes étapes de

la résolution de problème. Cette dernière catégorie recouvre la situation la plus fréquente dans les environnements interactifs d'apprentissage et mérite une analyse plus détaillée. Plusieurs techniques assez variées sont utilisées. Cela va du diagnostic *issue-tracing*, *model-tracing*, en passant par le diagnostic basé sur un système expert, sur la recherche de chemin, et finalement par la reconnaissance de plan. Nous proposons ci-dessous une analyse détaillée de ces diagnostics :

- **Diagnostic *model tracing* ou par tracage de modèle**¹¹. Cette méthode a été mise au point par Anderson [Ohlsson 92] lors de l'élaboration des systèmes basés sur la théorie *ACT**. Elle présente une grande simplicité dans sa mise en oeuvre. En effet, ces tuteurs représentent la connaissance à acquérir, ainsi que les malrègles attendues de la part d'un apprenant, sous forme de règles de production (la connaissance procédurale est considérée dans cette théorie comme le plus haut degrés d'acquisition de la connaissance). Le diagnostiqueur du système exécute l'ensemble de ces règles en les appliquant au problème posé à l'élève. Les étapes empruntées par le modèle de l'expert sont mémorisées puis comparées à celles empruntées par l'élève. Si l'étape de l'élève est celle de l'expert, le tuteur ne fait rien ; si l'étape correspond à une règle incorrecte, le tuteur corrige l'élève. Par conséquent, la correction des erreurs est entreprise dès leur production et non pas de manière différée ce qui présente un avantage non négligeable pédagogiquement parlant. Toutefois, cela implique que le système ne laisse pas l'élève explorer des chemins différents de ceux proposés par l'expert. Sont donc exclus les chemins incorrects mais également les chemins corrects mais sous-optimaux. L'élève ne peut donc se rendre compte lui-même de ses erreurs en se retrouvant dans une impasse par exemple. De plus, cette méthode nécessite un catalogue exhaustif de malrègles afin de reconnaître les étapes incorrectes de l'apprenant. Ce caractère exhaustif doit être présent dans la description des règles correctes et dans celle censé refléter la vue de l'élève sur les connaissances considérées. Cela est relativement lourd dans l'élaboration d'un système. Effectivement, pour donner un ordre de grandeur de l'importance d'une telle élaboration, lors de la constitution de la base de règles du système LISP, 1200 éléments ont été nécessaires.

De plus, la recherche des étapes possibles peut prendre beaucoup de temps ce qui est un facteur important lorsque le diagnostic est on-line. Afin de limiter le temps nécessaire à cette recherche, certains tuteurs adoptent comme solution une limitation de l'espace de recherche ; ainsi, le tuteur ne travaille qu'à partir d'un sous-ensemble de règles, en fonction du niveau cognitif actuel du sujet ;

- **Diagnostic des notions importantes ou *issue tracing***. Cette technique repose sur l'idée qu'on ne peut pas et qu'il ne faut pas suivre chaque pas du comportement de l'élève et qu'il est plus pertinent de repérer les concepts importants qui sous-tendent le comportement de l'élève. Les concepteurs des tuteurs doivent énoncer les notions importantes sous forme de *contraintes*. Ces dernières forment un sous-ensemble plus ou moins grand des notions du domaine enseigné. Le diagnostic est alors l'ensemble de ces exigences qui sont soit respectées, soit non respectées par la réponse de l'élève. C'est une technique qui a été utilisée pour la première fois dans WEST [Wenger 87]. Les notions identifiées dans ce jeu appartiennent au domaine arithmétique (opérateur, parenthèses . . .) et au domaine du jeu (techniques et directions du déplacement). A chacune des notions est associée un outil de reconnaissance (*recognizer*) qui analyse les déplacements de l'élève et ceux de l'expert pour déterminer si la notion a été employée ou omise.

Un des avantages de ce mécanisme d'acquisition d'informations sur l'apprenant est qu'il permet une abstraction sur les informations obtenues ; en effet, l'ordre chronologique des étapes effectuées n'influe pas sur le diagnostic par exemple. De la même manière, une erreur particulière n'est en rien importante puisque le diagnostic révèle des classes d'erreurs et non des listes d'erreurs précises sur les connaissances de l'élève. Ces dernières sont d'ailleurs inutilisables par le tuteur.

11. Traduction que nous proposons pour "model tracing"

De plus, selon Ohlsson [Ohlsson 87], cette méthode de diagnostic est indépendante du domaine enseigné. D'un point de vue plus pratique, cette technique de diagnostic a l'avantage de ne pas entraîner une explosion combinatoire lors de son exécution ; il suffit, à chaque étape, de tester pour chaque contrainte si elle est respectée ou pas. Par conséquent, si on a n contraintes et m étapes, le diagnostic est d'une complexité de $m*n$.

Toutefois, bien qu'Ohlsson ait montré que cette technique était utilisable de manière indépendante du domaine et qu'il l'a montré pour des domaines bien définis tels que les mathématiques, la chimie, etc, la détermination des contraintes peut poser problèmes pour des domaines moins formels. D'un point de vue pratique, ce type de diagnostiqueur a aussi l'inconvénient de ne pas avoir forcément accès à l'ensemble des pas du processus de résolution de problème de l'apprenant. Un premier travail nécessaire à l'application de cette recherche est alors d'identifier les étapes suivies par l'élève, ce qui n'est pas une tâche aisée ;

- **Diagnostic basé sur un système expert ou à base de règles.** Ce type de diagnostic consiste à décrire le diagnostiqueur sous la forme d'un ensemble de règles de production qui associent, à chaque type de réponse de l'élève, le diagnostic qui correspond. La mise en oeuvre d'un tel diagnostic est simple, mais elle retrouve les inconvénients qui sont liés à la notion de catalogue prédéterminé (détermination, exhaustivité, spécificité par rapport au domaine). Cette formalisation du diagnostic n'a été adoptée que dans de rares cas. Le plus caractéristique est GUIDON [Clancey 83], développé pour construire un modèle des connaissances de l'élève et utilisé pour conduire la discussion avec ce dernier. Le modèle de l'élève est calqué sur le modèle de connaissances de MYCIN et contient des coefficients associés aux règles de MYCIN, représentant une estimation de la croyance de l'élève dans chaque règle. Les règles de GUIDON qui sont indépendantes du domaine, examinent dans leurs antécédents les hypothèses formulées par l'élève et leurs relations avec les conclusions de la règle en question dans MYCIN. Il s'agit en quelque sorte d'appliquer la même technique de diagnostic pour les connaissances de l'élève et pour le problème médical ;
- **La recherche de chemin.** Cette méthode consiste à élaborer un algorithme qui permette de retrouver *on-line* les étapes intermédiaires effectuées par l'élève pour aboutir à sa réponse. Cet algorithme peut fonctionner soit en *chaînage avant* ce qui revient à appliquer les règles dont le diagnostiqueur dispose aux étapes considérées à un instant donné afin de déterminer les étapes éventuellement plus proches d'une solution, soit en *chaînage arrière* en partant d'une étape α_i de la résolution de problème de l'élève et en calculant les étapes à partir desquelles l'application d'une règle permet d'aboutir à cette étape α_i . L'algorithme se poursuit itérativement jusqu'à ce que la solution soit trouvée (l'étape en chaînage avant et celle en chaînage arrière). Signalons que le choix des étapes à traiter en priorité lors d'une itération est fonction d'heuristiques. Ainsi, cet algorithme ne construit pas tous les chemins possibles qui aboutissent à toutes les réponses diagnosticables par le système. Le problème du stockage de ces données ne se pose plus. Toutefois, l'explosion combinatoire inhérente aux essais successifs de toutes les règles, pour chaque étape intermédiaire, est un problème pratique majeur lorsqu'on tente d'implanter un diagnostiqueur *on-line* ;
- **La reconnaissance de plan.** Cette dernière technique consiste à déterminer le plan ou le graphe qui sous-tend les actions effectuées par l'élève. Elle est applicable dans les domaines où la tâche à accomplir est suffisamment précise et où les actions élémentaires sont clairement identifiées. Elle suppose que la résolution peut se décomposer en buts et sous-buts jusqu'au niveau des actions élémentaires. A partir des actions élémentaires, il s'agit alors, dans le problème de reconnaissance, de dégager un, voire plusieurs plan(s). Les réponses ou les expérimentations de l'apprenant forment une trace plus ou moins sophistiquée, pouvant aller jusqu'à un véritable graphe de ses intentions [Djamen 94]. Les réponses fournies par l'expert pour conduire les sessions tutorielles forment un graphe, appelé souvent graphes des tâches, contenant toutes les solutions relatives au

problème posé. La trace est comparée au graphe des tâches, à l'aide d'un algorithme de filtrage plus ou moins complexe. Les résultats que l'on peut attendre de cet algorithme de filtrage dépendent essentiellement de la représentation choisie pour le graphe des tâches. Dans SHERLOCK, par exemple, le graphe des tâches (appelé espace problème [Newell 72]) contient des noeuds qui sont des solutions partielles. Les arcs représentent différents passages d'une solution partielle à une autre, plus avancée. Plus précisément, l'espace problème est un treillis de sous-butts reflétant les multiples chemins vers la solution du problème. Ainsi, en partant du noeud racine, les liens désignent les tâches que l'utilisateur doit effectuer.

Des démarches similaires sont utilisées dans des systèmes tel que ACE [Sleeman 82] pour la compréhension de la démarche d'un apprenant en algèbre, ou MENTONIEZH [Py 96]. Cette technique est plus efficace que celle dite par recherche de chemin lorsqu'il manque beaucoup d'étapes mentales entre deux étapes observées, puisqu'elle permet de retrouver les étapes possibles en se basant sur les buts intermédiaires que l'élève a dû se fixer. Ces informations supplémentaires permettent aussi de discriminer entre plusieurs étapes candidates. Néanmoins, cette méthode requiert une bibliothèque de plans qui doit être prédéterminée par les concepteurs du système. De plus, il faut souligner que cette méthode de reconnaissance de plans repose sur des hypothèses très fortes d'une part, et qu'il existe d'autre part des dangers à représenter les solutions par un graphe quelconque. En ce qui concerne les hypothèses, la recherche d'un plan suppose que :

- l'élève a un but final. Celui-ci est fixé par le contrat didactique qui est de répondre à la question posée dans l'énoncé du problème ;
- l'élève organise sa résolution suivant un plan c'est-à-dire une décomposition hiérarchique en sous-butts ;
- l'élève effectue toutes les actions nécessaires à la poursuite d'un but donné, ou du moins les plus significatives ;
- l'élève n'effectue aucune replanification c'est-à-dire qu'il mène son plan jusqu'à la fin même s'il s'aperçoit en cours de réalisation du plan que celui-ci n'est pas valide.

Quant à la représentation des solutions à l'aide de graphes, les problèmes les plus importants peuvent être de types variés ; Pachet dans [Pachet 96], nous en cite au moins sept différents qui vont de l'identité des tâches (que représente un noeud ayant plusieurs prédécesseurs ? une identité structurelle ou une identité physique ?) à la complexité calculatoire.

A la fin de cette première phase, le système a identifié la ou les réponses de l'élève, ses erreurs, les a évaluées, ... Il lui reste maintenant à l'intégrer en tant qu'information apte à refléter et renseigner sur l'état cognitif de l'utilisateur. Ceci relève de la seconde phase que nous abordons ci-dessous, la phase de synthèse.

Seconde étape : la synthèse des nouvelles connaissances

Comme nous l'avons signalé dans la section précédente, les techniques de synthèse des connaissances sont relativement peu utilisées dans les tuteurs actuels. Cela est dû notamment aux difficultés relatives à l'élaboration de tels mécanismes et à la difficulté de l'évaluation des informations issues de la synthèse. Nous choisissons d'exposer d'abord succinctement deux phénomènes qui illustrent les difficultés de synthèse des informations qui sont les informations bruitées et l'évolution des informations au cours du temps. Dans un second temps, nous présentons quelques méthodes utilisées par les systèmes actuels.

Le bruit et le temps. Comme nous l'avons déjà dit à maintes reprises, l'objectif du profil et du modèle de l'apprenant est de modéliser au mieux l'utilisateur et ceci grâce à des données variées. En ce qui concerne les informations extraites à partir des réponses de l'élève qu'il faut intégrer au profil, la difficulté

centrale à résoudre est : quand et comment décider qu'une information différente de celles modélisées jusqu'à présent est à intégrer ?

En d'autres termes, cette interrogation revient à se demander comment distinguer une réponse qui reflète l'état cognitif actuel de l'élève d'une autre attribuable à de l'inattention, de la fatigue . . . Afin de formaliser ces informations, ces propriétés, un ordre partiel $<_{SMA}$ exprimé et proposé dans Danna [Danna 97] peut être utilisé. Celui-ci exprime le point de vue de tuteurs humains à propos de la synthèse des observations qu'ils font sur l'apprenant, en formalisant notamment le fait que certaines informations sont plus représentatives que d'autres par exemple. Par souci de simplification de la représentation de cet ordre formel, nous énonçons les propriétés décrivant cet ordre uniquement pour une connaissance donnée, sachant que le traitement est le même pour toutes les connaissances. Nous utilisons pour l'énonciation de ces propriétés les notations suivantes :

- + dénote le diagnostic d'un crédit pour la connaissance considérée ;
- - désigne le diagnostic d'une information de débit ;
- \pm_i^n dénote la série de n diagnostics réalisés successivement entre les instants t_i et t_{i+1} , où chaque diagnostic donne des informations de débit ou de crédit.

l'évolution temporelle. La connaissance du sujet, surtout dans un système d'apprentissage, évolue dans le temps. Toujours pour adapter au mieux les interactions, le système doit davantage tenir compte d'une information récente, censée refléter l'état cognitif actuel de l'apprenant, que des informations acquises antérieurement. Cela revient donc à définir un nombre N d'interactions à partir duquel un tuteur humain estime généralement que les réponses antérieures ne sont plus à considérer comme représentatives de l'état cognitif de l'apprenant. Inversement, si le seuil n'est pas dépassé, le tuteur doit prendre en compte les diagnostics antérieurs. En termes plus formels, cela s'exprime de la manière suivante :

$$\forall (n_1, n_2) \in \mathbb{N}^2 : n_2 > N \models \pm_i^{n_1} \pm_{i+n_1}^{n_2} = SMA \pm_{i+n_1}^{n_2}$$

où N est un seuil à déterminer.

le bruit. Les informations que l'on appelle bruitées c'est-à-dire les coquilles, les erreurs d'inattention, etc, ne doivent pas être prises en compte dans l'élaboration du profil de l'élève puisqu'il ne modélise en rien son état cognitif. La difficulté réside alors en la détection de ces bruits et en un traitement adéquat de ces données. L'idée classique est de considérer qu'une information isolée, d'autant plus qu'elle apparaît contradictoire avec les autres données, est un bruit. On décide alors de ne pas trop accorder d'importance à cette information. En termes plus formels, en ce qui concerne les bruits relatifs à des informations de débit, il faut faire en sorte que :

$$\forall (n_1, n_2) \in \mathbb{N}^2 : n_2 > N \models +^{n_1} - +^{n_2} = SMA +^{n_1} +^{n_2}$$

La question que l'on peut toutefois se poser est pourquoi tenir compte de cette information même si l'on minimise son impact sur le profil si l'on est sûr que l'information est une information bruitée ? En fait, on ne sait qu'après coup que cette information est réellement bruitée lorsque les réponses ultérieures ne suivent pas la même direction que cette information. On ne peut par conséquent éliminer une information uniquement parce qu'elle diffère des réponses précédentes sous peine de passer à côté d'un début de modification des connaissances.

On obtient l'ordre partiel souhaité en ajoutant l'inéquation suivante aux deux premières propriétés énoncées :

$$\forall n \in \mathbb{N} : n \geq 1 \models -^n < SMA +^n$$

Cependant, même si ces trois propriétés paraissent nécessaires à l'élaboration d'un profil utilisateur, la validité psycho-cognitive dont le système de synthèse respecte les caractéristiques reste à prouver. En particulier, il reste à déterminer si ces propriétés sont suffisantes. Finalement, le seuil N reste encore à déterminer.

Les méthodes de synthèse Deux types de méthodes peuvent être distinguées; celles reposant sur des notions numériques, c'est-à-dire statistiques pour la plupart ou apparentées à celles-ci pour les autres, et celles reposant sur des notions plus symboliques pour les méthodes provenant du domaine de l'apprentissage automatique ou s'appuyant sur du raisonnement hypothétique. Nous proposons dans la suite de cet exposé de présenter les particularités de ces deux types de méthodes ainsi que quelques exemples.

Les systèmes de synthèse numériques Ces méthodes de synthèse ont été très étudiées et même si la majorité des études ont été réalisées hors contexte de modélisation de l'apprenant, les résultats obtenus sont généralement applicables.

Ces méthodes permettent de représenter le niveau de l'élève en une connaissance particulière (un coefficient) via une évaluation numérique sur une échelle continue de valeurs. Des fonctions, classiquement deux types de fonctions (une fonction de dévaluation et une de renforcement), font évoluer ces coefficients. Ces dernières sont utilisées de manière complémentaire pour ajuster les coefficients au niveau de maîtrise de la connaissance cible et ceci de manière plus ou moins complexe, pouvant aller de la simple incrémentation à des combinaisons de fonctions. Toutefois, la détermination de ces deux fonctions reste difficile; des fonctions trop naïves ne permettent pas de prendre en compte l'évolution temporelle et la notion d'information bruitée tandis que les fonctions complexes rendent la compréhension du système de synthèse ardue et souvent opaque.

Nous illustrons ci-dessous l'utilisation de cette méthode numérique au travers de quelques tuteurs qui mettent en oeuvre des fonctions de plus en plus complexes ou tout au moins très diverses. Cette diversité provient entre autre de l'aspect subjectif de l'évaluation; chaque concepteur a sa propre conception de la manière d'évaluer une réponse, de définir ce qu'est une réponse correcte et une réponse erronée. Si le concepteur prévoit que le diagnostiqueur ne fournit que peu d'informations et qu'en plus, ces informations ne seront pas bruitées, alors le choix se porte sur un mécanisme de synthèse évoluant rapidement. A l'opposé, si le diagnostiqueur est prévu pour acquérir beaucoup d'informations dont certaines sont bruitées, le choix du concepteur se porte sur un système de synthèse ayant davantage d'inertie.

- **WEST ou FBM et l'incrémentation de compteurs.** Dans le tuteur WEST, on a recours à deux compteurs: l'un relatif à l'utilisation d'une connaissance par l'élève (noté $E1$) et l'autre relatif à l'utilisation d'une connaissance par l'expert (noté Ex) que l'on a schématisé sur la figure 2.6 page 46. A chaque connaissance, comme l'utilisation du parenthésage par exemple, est associé le nombre de fois où l'élève et l'expert, dans chaque contexte, ont utilisé ou non cette connaissance. L'évaluation des connaissances de l'élève résulte en fait du calcul des rapports entre ces deux compteurs. Ainsi, si l'élève a utilisé une connaissance en même temps que l'expert, l'incrémentation des deux compteurs fait que la probabilité que l'élève maîtrise cette connaissance augmente. La dévaluation est effectuée automatiquement selon le même principe lorsque le compteur de l'expert est incrémenté alors celui de l'élève ne varie pas.

La prise en compte de l'évolution des connaissances dans le temps n'apparaît toutefois pas dans ce tuteur, ni celle concernant les informations bruitées (tout au moins explicitement).

Dans FBM, alors que le principe de synthèse est identique à celui de WEST, c'est à dire qu'il y a renforcement par incrémentation du coefficient associé à la règle de production représentant le comportement que l'élève a montré et que la dévaluation y est effectuée automatiquement, puisque l'espace des probabilités est réparti entre les différents type de comportement, l'évolution des

comportements est prise en compte au travers d'un système de *data aging* (datation des données) qui permet d'accorder un poids d'autant plus important qu'il concerne des informations acquises récemment. Ce mécanisme consiste à dévaluer, à chaque apport de nouvelles informations, tous les coefficients associés aux types de comportements montrés jusque là par un certain facteur τ fixé à 0.9.

- **XTRA-TE et l'utilisation de fonctions polynomiales.** Dans ce système, le renforcement d'un coefficient est effectué grâce à la fonction $renf(x) = \sqrt{x}$ et la dévaluation avec la fonction $dval(x) = x^2$. L'inconvénient majeur de l'utilisation de ces fonctions est que la modélisation d'un oubli ou d'une connaissance maîtrisée très bien à un moment donné dans le modèle de l'élève empêche ensuite une modification de cette modélisation. En effet, à cause de l'arrondi, dès qu'une probabilité atteint 1 ou 0, les fonctions de dévaluation et de renforcement n'ont plus d'effet sur elle.
- **SHERLOCK II et l'utilisation d'une constante.** Les fonctions d'évolution utilisées dans SHERLOCK II sont plus complexes [Katz 94]. Elles utilisent à la fois une constante c qui mesure le degré de rapidité avec lequel les changements dans le comportement de l'élève sont répercutés dans les mesures et un vecteur V à cinq composantes $(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$ qui définit la manière dont se déroule cette répercussion. Chaque variable F_k définie dans SHERLOCK II dénote la maîtrise qu'a l'apprenant d'une connaissance donnée. Ainsi, les fonctions d'évaluation d'une variable F_k sont définies de la manière suivante :

$$\begin{aligned} & - dval(f_i) = f_i - f_i v_i c + f_{i+1} v_{i+1} c, \forall i \in [1; 4] \\ & \quad dval(f_5) = f_5 - f_5 v_5 c; \\ & - renf(f_1) = f_1 - f_1 v_1 c, \\ & \quad renf(f_i) = f_i - f_i v_i c + f_{i-1} v_{i-1} c, \forall i \in [2; 5] \end{aligned}$$

Ajouter à cela également, le fait que ce système utilise trois types de vecteurs V , selon le niveau de l'élève qui peut donc prendre les valeurs novice, ponctuel ou proche d'un expert. Cela permet en fait d'obliger le système à ne pas trop vite considérer un novice comme un expert.

Les systèmes de synthèse symboliques Il existe très peu de processus de synthèse d'informations basés sur des techniques purement symboliques. Un des rares tuteurs à utiliser ces systèmes pour synthétiser les informations acquises est DEBUGGY. L'originalité de l'approche est due à une volonté de répondre aux questions simples qui sont : Que faire lorsqu'une information contradictoire avec le modèle de l'élève est obtenue par le diagnostiqueur ? Quelles informations doit-on alors conserver dans le modèle de l'élève ?

Afin de gérer ce problème, le principe des coercions est utilisé [Wenger 87] : une *coercion* permet de ne pas tenir compte d'une erreur telle qu'une erreur d'inattention par exemple. Ce principe ne peut être utilisé seul puisqu'il ne permet de gérer que les inconsistances ponctuelles. En effet, en l'appliquant de manière abusive, toutes les réponses, qu'elles soient correctes ou non, peuvent être expliquées en termes de coercions. Par conséquent, les coercions ne sont utilisées que pour discriminer des hypothèses suffisamment renforcées par des informations obtenues antérieurement qui portent sur la connaissance de l'apprenant. Bien que partiellement satisfaisant, le principe de coercions a l'avantage d'être une des rares approches non numériques pour traiter des inconsistances ponctuelles.

Plus récemment, d'autres systèmes basés sur des notions symboliques sont proposés. Le principe repose sur la mémorisation des conditions ou justifications (endorsements [Cohen 85]) qui ont conduit aux évaluations. De manière concrète, cela revient à associer, à chaque évaluation d'une connaissance de l'élève, les arguments qui ont poussé le tuteur à porter cette évaluation. Si ces raisons viennent à disparaître, lors d'interactions ultérieures, l'évaluation est alors remise en cause. L'implémentation est

généralement réalisée à l'aide d'un système de maintenance de cohérence particulièrement bien adapté à ce genre de problèmes. Ce système a été initialement utilisé dans des systèmes où les concepteurs mettent l'accent sur le caractère incertain du diagnostic. Dans ce type de système, le modèle de l'élève est considéré comme un recueil d'hypothèses qui peuvent être révisées [Huang 90]. Le processus de gestion des justifications s'applique récursivement à toutes les inférences effectuées par le système de modélisation de l'apprenant. Toutefois, afin de prendre la décision de suppression d'une hypothèse, la plupart des concepteurs ont recours à une interrogation directe de l'apprenant, ce qui pose un problème de validité important lorsque l'on considère que ce dernier peut fournir des informations incorrectes dues à une incompréhension du vocabulaire utilisé ou à une absence de prise de conscience de ses propres connaissances.

3.3.2 Le système d'aide et les stratégies pédagogiques

Comme nous venons de le voir, la mise à jour de la modélisation de l'apprenant que ce soit au niveau de l'acquisition des connaissances ou au niveau de leur intégration dans le modèle, n'est pas un processus simple. Toutefois, il ne constitue qu'une partie cachée du système. En effet, même si cette étape est indispensable, elle ne représente pas une fin en soi ; l'objectif d'un tuteur est de permettre à son utilisateur d'acquérir des connaissances.

Celle-ci prend naissance au sein d'un déroulement cyclique par session : présentation d'informations et d'une question, réponse de l'apprenant, analyse de la réponse puis continuation ou branchement à une autre partie du cours. Toutes les questions doivent être soigneusement spécifiées par l'auteur du cours, de même que l'ensemble des réponses attendues des apprenants à chacune d'entre elles. Ainsi, changer un ensemble de questions ou une partie du cours conduit à un gros travail de réécriture.

Les programmes qui sont développés s'appuient surtout sur les éléments de connaissance qu'ils incorporent pour laisser une plus grande marge d'initiative à l'apprenant. Il n'y a pas de référence à des théories de l'apprentissage très précises, si ce n'est la mention de l'apprentissage par l'action dans la résolution de problème. Dans la mesure où une planification complète¹² *a priori* n'est pas possible et souhaitable, le système doit reposer sur des principes généraux pour piloter le dialogue avec l'apprenant. Les chercheurs s'inspirent des dialogues socratiques, définissent des modes de guidage favorisant un apprentissage par la découverte et développent un mode d'intervention discret sur le modèle de l'entraîneur sportif (le coach). Les stratégies d'enseignement mises en place s'appuient sur une évaluation des connaissances et des faiblesses de l'apprenant.

Des formes de dialogue avec l'apprenant

Pour engager un dialogue avec l'apprenant sur un domaine, les systèmes doivent disposer d'une certaine "compréhension" de ce domaine, c'est-à-dire d'un formalisme pour représenter les connaissances de ce domaine et de mécanismes spécifiques pour les manipuler. Toutefois, le dialogue étant finalisé, les systèmes doivent suivre des stratégies particulières, de type tutoriel.

Le problème est de déterminer jusqu'à quel point ces stratégies de dialogue peuvent être indépendantes du domaine spécifique enseigné et si elles permettent effectivement d'adapter l'enseignement aux apprenants.

L'initiative mixte. L'initiative mixte caractérise un mode d'interaction dans lequel l'apprenant et le système peuvent prendre l'initiative à tour de rôle et poser des questions. Le système SCHOLAR [Carbonell 70]

12. Celle-ci est définie comme la possibilité de prévoir explicitement chaque réaction du programme associée aux réactions possibles de l'apprenant.

permet ce type de dialogue. La connaissance est représentée au travers d'un réseau sémantique dans lequel un nœud correspond à un objet ou à un concept géographique. Ce dernier est associé à un ensemble de propriétés affectées d'un indice d'importance qui permet de mesurer le degré de pertinence d'une propriété selon le contexte du dialogue. Des mécanismes de parcours dans le réseau sémantique et des règles d'inférence permettent de répondre aux questions posées par l'apprenant.

Le dialogue socratique. L'objectif d'un dialogue de type socratique consiste à conduire l'apprenant, par des questions successives, à formuler des principes généraux à partir d'exemples, à examiner la validité de ses propres hypothèses afin d'y déceler éventuellement des contradictions pour finalement extraire les déductions correctes à partir des faits qu'il connaît. Cela implique, pour le tuteur, une compréhension des hypothèses formulées par l'apprenant et la maîtrise du dialogue orienté vers la recherche de contradictions.

WHY met en œuvre un tel type de dialogue. Le système demande à l'étudiant de proposer différentes causes pouvant expliquer une situation (les chutes de pluie par exemple), de rechercher les causes principales et annexes puis, de formuler une règle générale. Tant que la règle proposée est fautive ou incomplète, le système fournit un contre-exemple et demande à l'apprenant de modifier cette règle en conséquence jusqu'à ce qu'une règle correcte et suffisamment générale soit trouvée. Le contrôle du dialogue est assuré par un ensemble d'heuristiques traduisant la méthode socratique.

Si WHY et les méthodes socratiques invitent l'apprenant à s'engager dans un réel processus d'investigation, l'interaction reste entièrement fondée sur un dialogue entre un apprenant et une machine. Fournir assistance et guidage à un apprenant, celui-ci ayant d'autres tâches à exécuter que répondre à des questions, amène à explorer d'autres pistes.

Guider l'apprenant

Les environnements d'apprentissage réactifs. Brown et Burton [Brown 82] introduisent l'idée d'environnement d'apprentissage réactif dans le cadre du projet SOPHIE. L'objectif est d'entraîner les apprenants au diagnostic de pannes dans le domaine des circuits électroniques. Un défaut ayant été introduit dans un des composants, la tâche de l'élève est d'isoler ce composant défectueux à l'aide d'une série de mesures. L'environnement est réactif dans le sens où il ne fait que répondre aux sollicitations de l'apprenant et ne prend jamais l'initiative.

L'interaction didactique discrète et les systèmes conseillers. Dans la perspective d'une interaction didactique discrète, nous présentons deux environnements : WEST et WUSOR.

Le principe de cette interaction consiste à "regarder par-dessus l'épaule" de l'apprenant durant son activité et à formuler des critiques ou des suggestions pour améliorer la performance (le computer coach).

WEST est une sorte de jeu de l'oie. Le trajet comporte soixante dix cases dont certaines d'entre elles correspondent à des villes. Le but du jeu est d'atteindre le premier la dernière ville. A chaque tour, un joueur dispose de trois nombres tirés au hasard avec lesquels il doit construire une expression arithmétique. Pour guider le joueur, le "coach" ne dispose que de peu d'informations. Il doit, à partir des choix successifs de déplacement, inférer quelles sont les compétences et concepts mis en œuvre ou manquants. Il se focalise sur certains aspects importants qu'il va pouvoir identifier dans les comportements observables. Un double processus de modélisation de l'apprenant et du fonctionnement du coach est proposé. Au niveau de l'apprenant, un résumé des performances successives obtenues au cours de la résolution d'une série de problèmes est constitué. Chaque point modélisé est analysé de manière à en extraire les aspects importants. Le même travail est effectué sur les choix de l'expert dans le même contexte. La comparaison de ces deux sources permet d'identifier la liste des faiblesses de l'étudiant ainsi que la liste de tous les déplacements jugés meilleurs que celui choisi par l'élève. A partir de ces deux listes, le coach

détermine un point particulier illustré par un exemple de déplacement. En fonction de principes généraux de guidage (douze principes sont établis. Ils correspondent à des règles portant sur quatre thèmes : le maintien de l'intérêt du jeu, la multiplication des occasions d'apprentissage, la prise en compte de l'aspect ludique, le guidage discret proprement dit), le coach décide ou non d'interrompre le déroulement de la partie. En cas d'interruption, le point choisi et l'exemple de déplacement correspondant sont fournis à un générateur d'explications. Le travail de Brown et Burton est fondé sur une vision constructiviste de l'apprentissage. L'élève apprend en construisant de nouvelles connaissances à partir des connaissances dont il dispose. Les erreurs qu'il fait peuvent s'avérer constructives s'il arrive à en déterminer la cause et à opérer les ajustements nécessaires. La tâche principale du coach est de fournir à l'apprenant les informations nécessaires pour l'aider à rendre ses erreurs constructives¹³. Pour cela, il ne doit pas intervenir trop souvent afin de laisser à l'élève la possibilité de juger lui-même son comportement. Le problème du coach est donc de déterminer à la fois le moment de l'interruption de l'activité de l'élève ainsi que le contenu à fournir au moment de l'interruption.

WUSOR met également en œuvre un coach. Goldstein et Carr [Carr 77] décrivent son fonctionnement comme l'interaction entre trois programmes spécialisés qui sont :

- l'Expert. Il avertit le Tuteur lorsque le choix de l'élève n'est pas optimal et précise quelles compétences sont nécessaires pour découvrir de meilleures possibilités (ces compétences sont des sujets de dialogue possibles pour le Tuteur) ;
- le Psychologue. Il inspecte le comportement de l'apprenant et formule des hypothèses sur les compétences qu'il possède et sur les modes d'enseignement susceptibles de lui permettre d'acquérir de nouvelles compétences (enregistrés dans le modèle d'apprentissage) ;
- le Tuteur utilise ces modèles pour individualiser ses interventions avec le joueur. Le modèle des connaissances guide la sélection d'un domaine parmi ceux qui sont proposés par l'Expert tandis que le modèle d'apprentissage influence le choix d'une stratégie d'explication. Enfin, un orateur convertit l'explication formelle générée par le Tuteur dans une forme appropriée à l'apprenant.

Doit s'ajouter un Auditeur, module de compréhension du langage naturel dont le rôle est de traduire les questions du joueur.

L'Expert, le Psychologue et le Tuteur forment une sorte de communauté de spécialistes communicant entre-eux. Cette description traduit bien la connexion étroite reliant les différentes expertises nécessaires pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un système de guidage adapté à un utilisateur.

Le travail d'un système conseiller consiste à observer le comportement d'autres systèmes et à raisonner sur les actions observées sitôt qu'elles sont lancées. Son rôle est de produire des conseils à partir de l'espionnage de l'interaction entre un utilisateur et un environnement d'apprentissage, conseils portant sur le contenu du domaine d'étude ou sur des méthodes permettant de résoudre une classe de problèmes. L'objet n'est pas de faire un guidage en pas-à-pas mais plutôt de suggérer des méthodes à utiliser pour faire progresser la démarche de l'apprenant. Paquette et son équipe ont développé plusieurs systèmes conseillers. Un des premiers systèmes nommé COPERNIC est dédié à l'induction des lois physiques. Créé au moyen d'extensions au système PRISME/LOUTI, il inclut des heuristiques adaptés des programmes BACON modélisant l'activité de chercheurs qui induisent des lois à partir de données expérimentales. La trop grande diversité d'intégration du module conseiller au système LOUTI a conduit à l'élaboration d'un système générique, EPITALK [Paquette 94]. Il s'agit de pouvoir greffer un système conseiller à toute application dotée d'outils d'aide à la tâche, sans en perturber le fonctionnement. Le système conseiller

13. On retrouve ici sous la notion du *coach* les idées de Vygotsky [Vygotsky 78].

est ici qualifier d'*épiphyte* dans le sens où il est indépendant du système hôte dont il observe le fonctionnement, son comportement étant celui des plantes épiphytes qui vivent par-dessus des plantes existantes sans perturber leur fonctionnement normal. Un tel conseiller peut intervenir aussi bien sur le plan du contenu que dans la méthode dans des scénarios d'usage individuel ou collectif. Les premières réalisations techniques et les premières applications semblent montrer qu'EPITALK permet de développer rapidement des systèmes conseillers opérationnels. L'une des limites toutefois de ce système est l'obligation de découper l'activité en une hiérarchie de tâches, ce qui suppose une activité suffisamment organisée et planifiée.

De tels systèmes conseillers généralisent les travaux sur l'interaction didactique discrète tels WEST et WUSOR. Des formes de résolution de problèmes tutorés correspondent à des sortes de cours particulier autour de la résolution d'ensembles d'exercices. Les tâches de résolution sont minimales, c'est-à-dire élémentaires, et peuvent être assistées par des techniques du type "traçage de modèle". Mais, sous jacentes, de nombreuses règles sont susceptibles de fournir des explications et les justifications que les étudiants doivent connaître. On dispose ainsi d'une forme d'aide conceptuelle éventuellement complétée par une aide sur le processus même suivi par les étudiants afin de les inciter, le cas échéant, à modifier leur techniques d'étude.

Bilan

Les systèmes qui viennent d'être présentés illustrent quatre stratégies d'enseignement différentes parmi d'autres qui sont l'initiative mixte, le dialogue socratique, l'environnement réactif et les systèmes conseillers. Nous arrêtons néanmoins l'énumération des différentes stratégies. Il en existe une grande diversité et il n'est pas possible de toutes les recenser, cela n'étant d'ailleurs pas le but de notre exposé. Cette multiplicité stratégique est due à la complexité du domaine des Sciences de l'Éducation qui empêche malheureusement l'existence d'un "manuel de pédagogie". En l'absence de modèles théoriques établis, les chercheurs se tournent vers les enseignants et analysent leur pratique pour alimenter les programmes qu'ils développent. Ainsi, les choix entre les possibilités stratégiques sont faites par les concepteurs du tuteur et reflètent leur position théorique au niveau pédagogique. La plupart des chercheurs se réclament toutefois du constructivisme. Mais, comme le montre Winn dans [Bruillard 97], cette invocation recouvre des positions très éloignées. Si tout le monde s'accorde sur le fait que les apprenants construisent eux-mêmes leurs connaissances, les avis divergent quant aux implications sur l'enseignement de ce principe de base. Pour certains la construction des connaissances requiert un peu plus que la seule adjonction de systèmes d'aide ou d'intervention discrète à des stratégies d'enseignement traditionnelles. Pour d'autres, la conception constructiviste implique que chacun d'entre nous connaît le monde d'une manière différente et qu'il n'est pas possible de penser concevoir un enseignement ayant des résultats prévisibles.

3.4 Bilan et ouverture

L'apprentissage, au travers des Sciences Humaines peut être vu comme une tâche finalisée dans laquelle l'état initial est l'état de connaissance actuel du sujet et l'état but, la satisfaction de l'objectif à atteindre. C'est entre ces deux états qu'a lieu l'apprentissage qui est en fait une modification quantitative et/ou qualitative des connaissances du sujet. Cette modification est, pour simplifier, la résultante de deux modes différents d'apprentissage qui sont l'apprentissage par instruction et par l'action. Outre ces directions générales, aucune méthode en tant que telle n'a une quelconque validité. De plus, même si les rétroactions telles que les encouragements, les conseils ont un effet non négligeable sur la direction que va suivre le sujet pour atteindre son objectif, aucun travaux n'est en mesure de répondre précisément à la

question du moment et de la forme que doivent prendre ceux-ci pour être optimaux pour un sujet donné.

Pour que le sujet considère que l'objectif à atteindre est satisfait, une évaluation est mise en place. Cette dernière peut être interne au sujet, c'est-à-dire que le résultat obtenu est comparé à une "norme" interne au sujet, et/ou externe, c'est-à-dire que le résultat obtenu est comparé à une référence externe au sujet, un tuteur humain par exemple.

Au niveau des systèmes existants, l'absence de mode d'emploi pédagogique conduit les concepteurs des systèmes à mettre en place des stratégies répondant à leur conception de ce que doit être le guidage dans une progression éducative plutôt que reposant sur un quelconque modèle. Ainsi, les systèmes foisonnent de propositions variées qui ne sont cependant que partielles. Ce que l'on peut toutefois extraire comme principe commun à tous les systèmes reposent sur deux thèmes qui sont :

- un objectif implicite à atteindre qui est l'adéquation entre l'état de connaissances de l'élève et celui des connaissances de référence même si pour certains des paliers intermédiaires sont proposés selon les niveaux évalués des sujets qui peuvent être par exemple le niveau novice, expert ou intermédiaires par exemple ;
- une évaluation qui prend comme référence les connaissances issues du module de l'expert et non les possibilités du sujet.

Ce que nous cherchons à mettre en œuvre au travers de nos propositions est une prise en compte du sujet lui-même et de ses possibilités dans le guidage que nous scindons en un enchaînement pédagogique et en une rétroaction à fournir au sujet. Pour ce faire, une internalisation de la référence ainsi qu'une variation de la rétroaction fournie en fonction des possibilités du sujet est amorcée et est développée dans la seconde partie de ce manuscrit (section 7.2 page 149).

Conclusion

Dans cette première partie, nous avons vu que les approches Psychologiques et Informatiques ne sont pas souvent mariées. Elles sont d'ailleurs difficilement conciliables.

Toutefois, nos propositions s'articulent selon deux aspects qui sont :

- des propositions reposant sur la constitution d'un modèle théorique d'acquisition dynamique des connaissances ainsi que la sélection d'un cadre de travail de type constructiviste favorisant la mise en œuvre des principes d'étayages ;
- des propositions théoriques concernant un processus informatique d'évaluation des réponses de l'utilisateur et un processus informatique de guidage individualisé.

Le type de système que nous retenons a pour principales contraintes l'indispensable adaptation du guidage (l'enchaînement pédagogique mais aussi les conseils) à un utilisateur, le traitement *on-line* des données et une prise en compte de l'individu avec ses possibilités, ses limites et ses besoins.

L'objectif ainsi fixé est ambitieux. Toutefois, même si notre travail ne permet pas de résoudre la totalité des contraintes ou de les résoudre de manière totalement satisfaisante, il a le mérite de proposer d'une part des propositions théoriques et conceptuelles allant dans ce sens ainsi qu'une solution réalisable et réalisée.

Deuxième partie

Une proposition théorique et pratique : le système GEREV



Introduction

Dans cette seconde partie, nous nous penchons davantage sur les propositions que nous faisons.

L'enchaînement des chapitres centraux (chapitre 5, chapitre 6 et chapitre 7) repose sur le fait que pour adapter un système informatique (chapitre 7) à un utilisateur quelconque, il faut se donner les moyens d'évaluer les réponses de cet utilisateur (chapitre 6). En effet, comment adapter une interaction entre le système et son utilisateur si l'on n'a pas les moyens de déterminer le type de réponses produites, si l'on ne dispose pas d'un mode de catégorisation quantitative ou qualitative d'une interaction ?

Pour évaluer les réponses de l'utilisateur, le système informatique doit être en mesure de manipuler les connaissances, de les utiliser. Pour ce faire, le concepteur de tout système doit se poser le problème de la représentation des connaissances. Celle-ci est abordée dans le chapitre 5.

Notre travail, nos propositions s'articulent autour de ces trois thèmes ou domaines quasiment indissociables lorsque l'on s'interroge sur les aspects de guidage non-prédéterminé de l'utilisateur.

Deux chapitres encadrent ces chapitres centraux. Le premier présente le domaine d'application retenu qui est celui de la rééducation vocale chez le déficient auditif, les spécificités qui y sont attachés et les besoins rencontrés dans un tel domaine. Ce chapitre permet de concrétiser et de donner un corps applicatif aux notions et principes soutenus dans les chapitres 5, 6 et 7. Toutefois, la réelle présentation de notre système, GEREV, n'a lieu qu'au travers du dernier chapitre de cette partie (chapitre 8). Ce dernier se consacre uniquement à une description des choix informatiques, des structures de données, des fonctions et des applications effectives des principes précédemment décrits.

Chapitre 4

De SIRENE à ... SIRENE et GEREV

L'objectif de nos propositions est de permettre un guidage de l'utilisateur dans un système informatique d'apprentissage qui tienne compte des possibilités et des connaissances de celui-ci. Pour illustrer et montrer leur applicabilité, nous nous sommes intéressés à un domaine bien particulier qui est celui de la rééducation vocale pour déficients auditifs.

Nous proposons tout d'abord un bref préambule dans lequel nous exposons la relation existant entre le spécialiste-orthophoniste et le sujet au niveau de la rééducation. Puis nous présentons l'intérêt, dans ce cadre, de l'introduction d'un système informatique (page 80) qui puisse éventuellement proposer une aide rééducative qui aille au delà de la rétroaction visuelle des paramètres vocaux (page 87). Nous concluons ce chapitre par une présentation du modèle théorique sous-jacent au système informatique implanté (page 99).

Un sujet en phase de rééducation présente certaines particularités relatives au degré de déficit présenté mais aussi à ses possibilités à un moment donné. Pour mettre en place en entraînement, une rééducation, le spécialiste effectue un diagnostic préalable à toute action corrective, un bilan orthophonique. Ce diagnostic lui permet d'élaborer un profil du patient indispensable à l'établissement d'un programme rééducatif. La rééducation, en tant que telle, peut alors commencer. Elle consiste en un retour permanent entre la production du sujet, une évaluation de celle-ci et un apport de conseils appropriés de la part du spécialiste.

Dans le cadre de la rééducation vocale pour déficients auditifs, les moyens d'action disponibles et utilisables par le spécialiste sont essentiellement kinesthésiques et visuels.

L'instauration de la parole nécessite un système de contrôle qui permet au locuteur d'ajuster les différents paramètres (fréquence fondamentale, intensité sonore, débit ...) intervenant dans une production vocale. Ce contrôle est normalement assuré par l'audition. Chez les sujets déficients auditifs, il ne peut être assuré dans de bonnes conditions. Cela entraîne des perturbations notamment au niveau de la qualité et de l'intelligibilité de la voix. Le degré d'altération est fonction de l'importance du déficit de l'audition et du degré d'acquisition du langage à l'âge de survenue du déficit auditif. En ce qui concerne l'importance du déficit, plus la courbe audiométrique du sujet est limitée, plus l'altération de la voix est importante, dans la mesure où les fréquences non perçues, correspondant aux différents sons de la parole (les voyelles et les consonnes ont des fréquences comprises entre 200 et 12 000 Hertz), ne peuvent être reproduites puisque impossibles à imiter. Quant à l'âge de survenue du déficit, selon ce que nous venons de décrire, il est évident que plus l'altération est tardive, plus le sujet a acquis ses compétences langagières et ainsi, plus il est aisé de contrôler et maintenir une certaine qualité vocale.

L'idée la plus répandue dans le milieu entendant est que les sujets déficients auditifs vont pallier cette perception lacunaire par des informations visuelles tirées de l'observation des mouvements des

lèvres, de l'attitude du locuteur dans son ensemble. Toutefois, ces informations visuelles ne peuvent se substituer complètement à la perception auditive de la parole dans la mesure où certains éléments tels que les vibrations des cordes vocales, la nasalisation des sons ne peuvent être perçus visuellement. La production vocale ne peut alors s'appuyer sur cette rétroaction partielle sous peine de conduire à des perturbations articulatoires.

Si l'on considère maintenant la parole dans un système plus global, il faut souligner que celle-ci ne se réduit pas aux paramètres vocaux et articulatoires. En effet, la prosodie regroupe des caractéristiques importantes en ce qui concerne la qualité et l'intelligibilité de la parole. Ce dernier point est difficilement accessible par simple observation du mouvement de l'appareil articulatoire (lèvres, langue...).

Pour combler cette difficulté, une solution potentielle est le recours à des systèmes sophistiqués ou informatisés qui vont permettre une rétroaction de ces différentes composantes de la parole. Actuellement différents systèmes existent et peuvent être utilisés, mais aucun jusque SIRENE (*Système Interactif de REéducation vocale des Non-Entendants*) n'a la particularité de porter à la fois sur les paramètres vocaux, articulatoires et prosodiques.

Le système ISAEUS, en cours de développement dans le cadre d'un projet européen TIDE en constitue un des prolongement pour la langue française. SIRENE est issu de la convergence de travaux menés par des informaticiens et des orthophonistes qui ont ainsi permis de regrouper d'une part un système de reconnaissance analytique multilocuteur de la parole et d'autre part, un ensemble modulaire d'aides visuelles à l'éducation vocale. Nous présentons dans la section ci-dessous ces deux aspects du système.

4.1 Au commencement, il y avait SIRENE...

4.1.1 Une rétroaction visuelle : Quels signaux visualiser ?

La perturbation de la boucle audio-phonatoire chez le déficient auditif engendre des altérations diverses et souvent importantes de la voix et de la parole. Nous allons brièvement décrire les facteurs intervenant dans la production vocale normale et nous envisageons leurs principales modifications observées dans le cadre d'un déficit auditif.

L'ensemble des facteurs altérés doit donner lieu à une visualisation qui pourra compenser, tout au moins dans une certaine mesure, la limitation du système de contrôle de la voix dans le cadre d'un déficit auditif. SIRENE propose une visualisation de l'intégralité de ces facteurs intervenant dans l'élaboration d'une voix intelligible et de bonne qualité.

La plupart des définitions que nous proposons ci-dessous pour les paramètres sont issus de [Malmberg 98].

La hauteur de la voix

La hauteur de la voix, techniquement appelée *fréquence fondamentale* ou F_0 , est exprimée en Hertz (Hz). Elle est déterminée par le nombre d'accollements des cordes vocales par seconde. Plus la fréquence est grande, plus la hauteur est élevée et inversement. Les voix d'hommes sont généralement comprises dans un intervalle de 90 à 250 Hz, les voix de femmes entre 150 et 350 Hz et les voix d'enfants entre 200 à 450 Hz¹⁴. Les changements de fréquence de vibrations des cordes vocales produisent les variations de hauteur, dont le déroulement crée la mélodie de la parole.

Dans le cas des sujets non-entendants, on observe fréquemment des altérations de la hauteur de voix qui se manifestent par des montées subites en voix de tête sur certaines syllabes, des voix trop graves ou trop aiguës par rapport à leur groupe d'appartenance (hommes, femmes, enfants), des voix bitonales ou dans lesquelles le fondamental est absent ou perturbé.

14. Ces intervalles sont utilisés au niveaux rééducatif par les orthophonistes. Ils constituent des références pour ces experts mais ne sont pas des normes absolues. Ils sont utilisés par exemple dans SIRENE [Haton 98]

L'intensité

C'est ce que l'on appelle communément le volume sonore. L'intensité est exprimée en décibels (dB). Elle est la résultante de l'amplitude du mouvement vibratoire. Il faut également tenir compte du fait que l'intensité dépend de la fréquence. Plus celle-ci augmente, plus l'intensité devient grande. Ce facteur intervient fortement dans la qualité de la voix dans la mesure où elle doit être constante et ni trop forte ni trop faible. Elle dépend également de l'environnement sonore dans lequel est produite la parole.

Chez le sourd, ce facteur est difficilement contrôlable. En effet, l'intensité ne donne pas lieu à des indices nettement perceptibles visuellement. De plus, celle-ci est dépendante du contexte sonore ambiant ; dans un fond sonore silencieux, l'intensité adéquate est plus faible que dans un contexte sonore bruyant pour un même énoncé. Ainsi, on observe fréquemment une altération du contrôle de l'intensité. Elle est souvent trop forte ou trop faible. Elle peut également être sujette à des modifications brutales pour les phonèmes dont l'articulation est difficile pour le sujet.

Le timbre

Le timbre est dû à l'audibilité des harmoniques. Si deux variations de fréquences identiques sont combinées, le résultat devient - à condition que la phase soit identique - une augmentation de l'amplitude, d'où un renforcement du son. C'est au timbre que l'on doit la "couleur" du son. Elle est déterminée pour la parole par la fourniture laryngée primaire et surtout, par la forme et le volume des résonateurs.

Dans les cas de déficits auditifs importants, on peut constater un timbre pauvre ou criard, rauque ou nasalisé.

La respiration

La voix est du souffle sonorisé. Il est nécessaire d'avoir une certaine coordination pneumo-phonique dans la production vocale.

Celle-ci n'existe pas forcément chez le sujet sourd. On peut alors assister à des expirations courtes et à des reprises inspiratoires anarchiques qui ne sont pas adaptées à la parole.

L'articulation

Elle est déterminée par le passage de l'air dans les résonateurs qui constituent le canal vocal supérieur, de la glotte aux lèvres. Les résonateurs changent de forme et de volume pour chaque son selon les mouvements de la langue et des lèvres. D'un point de vue acoustique, ce sont le volume et la forme des cavités qui déterminent des fréquences de résonance.

Lors de déficiences auditives, des confusions articulatoires sont fréquemment réalisées. Deux types de confusions sont à considérer :

- celles résultant du mode d'articulation¹⁵ ;
- celles résultant du lieu d'articulation¹⁶.

De plus, des déficiences au niveau des réalisations des transitions phonétiques peuvent apparaître.

Le débit

Le débit est le nombre de syllabes produites par seconde. Ce nombre doit être proche des valeurs moyennes, c'est-à-dire aux alentours de 5.7 à 5.9 syllabes par seconde, en français spontané.

15. Le mode d'articulation permet de définir la manière dont s'opèrent les mouvements de l'appareil vocal.

16. Le lieu d'articulation permet de définir l'endroit du canal buccal où l'air phonateur rencontre un obstacle partiel dans le cas des constrictives, ou total dans le cas des occlusives.

Ce facteur est également perturbé dans le cas des déficiences auditives ; il est généralement ralenti et haché. On estime classiquement qu'il faut de 1,5 à 2,5 fois plus de temps à un sourd pour produire un énoncé que pour un normo-entendant. Cela se justifie généralement par le fait que l'acte phonatoire est prolongé en raison du contrôle permanent de l'articulation ainsi que par l'importance des pauses et de leur placements inadéquats.

Le rythme

Le rythme est le retour régulier, dans la chaîne parlée, d'impressions auditives analogues créées par divers éléments prosodiques [Malmberg 98].

Ici encore, ce facteur est très perturbé dans le cas de déficiences importantes de l'audition. Des ruptures rythmiques et mélodiques ne correspondant pas aux structures syntaxiques sont observées.

L'intonation

L'intonation est dépendante de la langue du locuteur ainsi que du type d'énoncé prononcé. Celle-ci suit des courbes intonatives décrites dans Carton [Carton 82].

La parole du sourd présente globalement, en relativisant en fonction du type d'éducation reçue, bien plus de prééminences prosodiques que la parole normale. Cependant, un grand nombre de ces prééminences peuvent être expliquées par des difficultés articulatoires ou phonatoires et n'ont ainsi pas de valeur linguistique.

Récapitulatif

Comme nous l'avons vu, l'absence plus ou moins partielle de rétroaction auditive a des conséquences importantes sur la production vocale du sujet. L'introduction d'un système tel que SIRENE a pour objectif de pallier à cette absence en proposant, au travers de la modalité visuelle, un moyen de contrôle de la production sonore du sujet. L'ensemble des facteurs précédemment évoqués prennent place dans un enchaînement rééducatif précis sur lequel nous allons maintenant nous attarder.

4.1.2 Une visualisation organisée

Pour chaque paramètre¹⁷ envisagé dans SIRENE, un exercice est proposé. A un exercice sont associés une tâche, un objectif rééducatif particulier tel que la maîtrise de la fréquence fondamentale. Cet objectif rééducatif prend corps au travers d'une interface graphique, d'une consigne et des conseils comme nous l'illustrons sur la figure 4.1.

La rétroaction visuelle proposée se fait, la plupart du temps, en temps réel ce qui maximise l'effet de contrôle de la production du sujet. De plus, il faut prendre conscience que la notion d'exercice coïncide en fait avec la notion de "type de tâche" dans laquelle plusieurs exemplaires de la même tâche vont être proposés. Les exercices sont regroupés à l'intérieur de trois modules. L'objectif du programme d'aide se résume en une amélioration de l'intelligibilité du sujet déficient auditif et ceci au travers d'un travail fondé sur la voix (intensité, fréquence fondamentale, voisement), sur l'articulation des sons (voyelles et consonnes) et sur la prosodie (intonation et rythme). L'enchaînement des exercices est déterminé par l'orthophoniste et suit une progression rééducative qui peut se synthétiser dans l'idée que la réussite à un paramètre nécessitant celle à un autre doit se situer après cette dernière. Ainsi, le module portant sur les paramètres de la voix est le premier à être envisagé, suivi de manière indifférenciée des modules sur les

17. Nous utilisons dans SIRENE préférentiellement le terme de paramètre à celui de facteur.

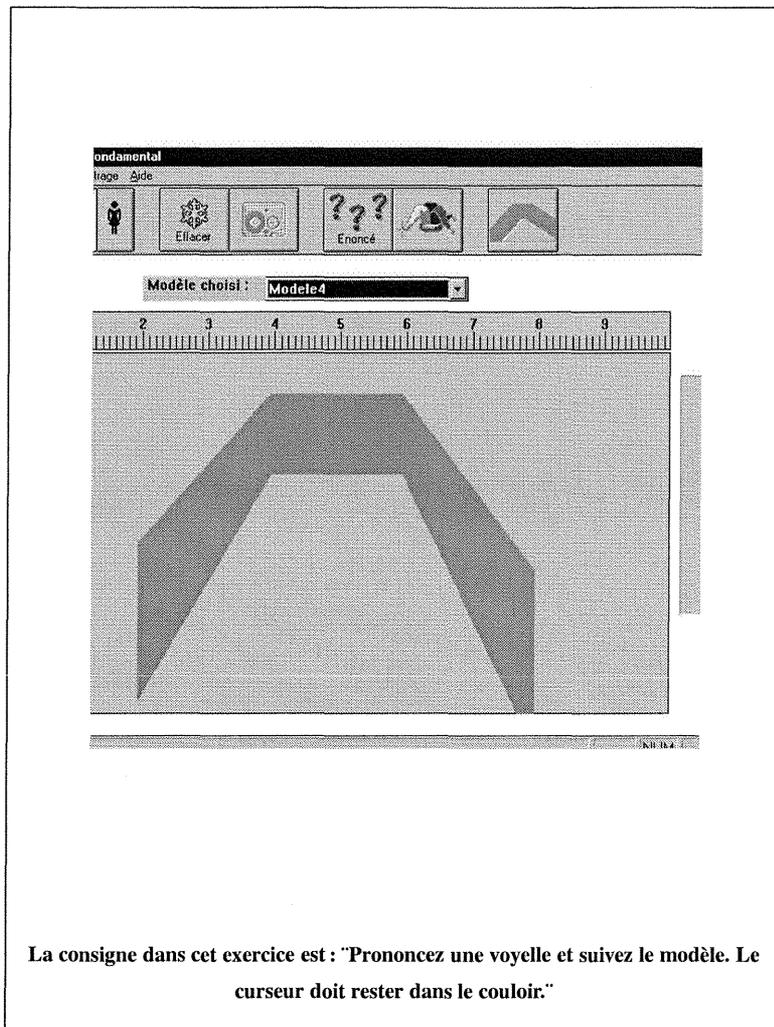


FIG. 4.1 – Une proposition de réalisation dans l'exercice "Maîtrise du fondamental"

paramètres de l'articulation et de la prosodie. Une description plus fine de l'enchaînement des exercices est proposée sur la figure 4.2.

Il nous semble pertinent de proposer ci-dessous une description des objectifs et des paramètres traités dans chaque exercice afin de pouvoir s'appuyer ultérieurement sur cette présentation pour illustrer notre travail.

Le module sur la voix

L'objectif de ce module est une voix bien timbrée, stable sur le plan du fondamental et qui se réalise dans le respect des caractéristiques propres à chaque individu. Ainsi, les exercices composant ce module portent sur un travail sur le souffle, sur la synchronisation souffle-voix, sur la stabilité et la maîtrise du fondamental. Ci-dessous, nous exposons de manière un peu plus pratique les exercices composant ce module.

- l'exercice sur le souffle. Il doit amener le sujet à adopter un souffle homogène (sans obstacle ni tension ou explosion) dont l'intensité et la durée soient contrôlées. Le souffle est la base même de

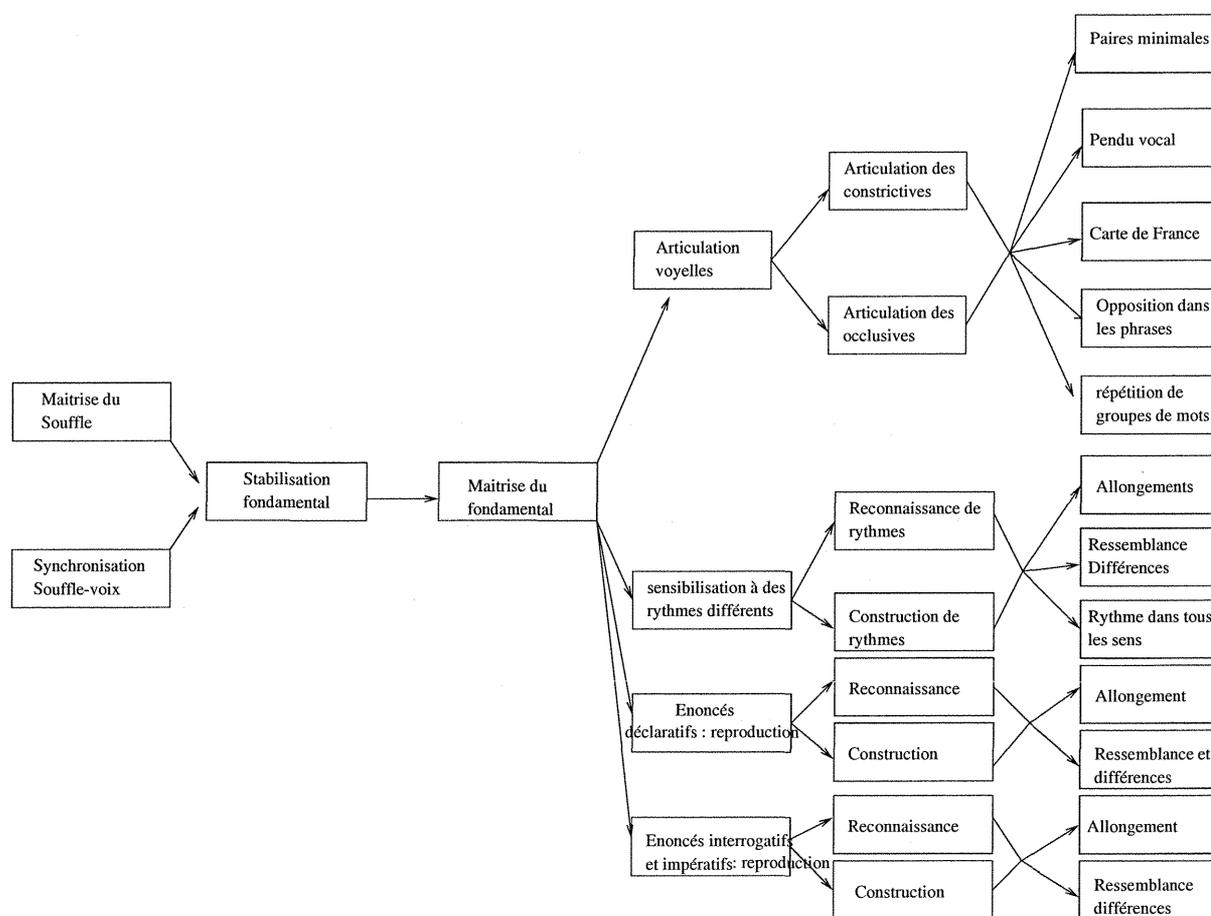


FIG. 4.2 – Représentation de l'enchaînement des exercices prévu dans SIRENE

l'activité vocale puisque la voix n'est rien d'autre que du souffle sonorisé ;

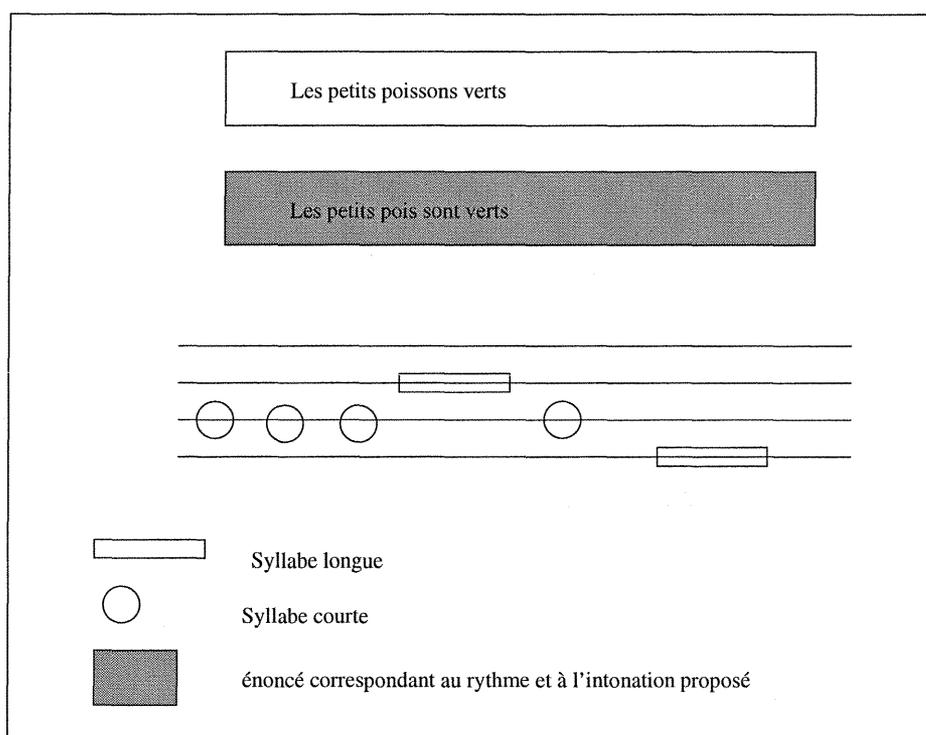
- l'exercice sur la synchronisation souffle-voix. L'exercice doit faire prendre conscience au sujet du passage continu du souffle à la voix et de la vibration des cordes vocales (voisement) qui doit s'effectuer dans de bonnes conditions ;
- l'exercice sur la stabilisation du fondamental. L'exercice doit permettre à l'orthophoniste de placer la voix du sujet par l'intermédiaire du contrôle visuel. Une fois cette première étape réussie, il doit permettre de stabiliser le son laryngien. En effet, un non-contrôle de celui-ci conduit à un passage anarchique d'un registre à un autre ;
- la maîtrise du fondamental. Une fois la stabilisation acquise, il faut mettre en place des variations contrôlées du fondamental dans la mesure où, sur le plan linguistique, ces variations sont indispensables pour la réalisation de variations mélodiques (l'intonation) du langage.

Le module sur l'articulation

Dans ce module, on distingue l'articulation des voyelles et celle des consonnes. L'objectif ici est de permettre de contrôler son système articulaire au niveau des sons isolés dans un premier temps et ensuite au niveau de la combinaison des sons.

Le module sur la prosodie

Les exercices proposés dans ce module ont pour fonction d'amener le sujet à maîtriser le rythme du français, les différents patrons intonatifs et le débit phonatoire. Ces facteurs ne sont pas des facteurs superflus ; ils sont indispensables à l'intelligibilité du message. Pour se convaincre de ce point, nous proposons juste un exemple sur la figure 4.3 qui illustre le fait que l'ambiguïté entre deux énoncés phonétiquement identiques mais sémantiquement différents est levée uniquement grâce à l'intervention de la prosodie (dans le cas bien entendu où ces deux énoncés sont prononcés hors contexte).



Comment distinguer "les petits pois sont verts" de "les petits poissons verts", si ce n'est par la prosodie ?

FIG. 4.3 – Illustration de l'importance de la prosodie dans la compréhension du français

Outre les visualisations et les regroupements des exercices au sein de modules, le système s'appuie sur une réflexion concernant l'aspect pédagogique de la progression rééducative. SIRENE n'est pas réductible à une suite de visualisations de différents objectifs d'acquisition ou d'exercices. Chaque exercice peut être décomposé selon trois moments rééducatifs ou *phases* qui reflètent la démarche classique et pratique mise en œuvre en rééducation orthophonique :

- la phase de sensibilisation ; elle a pour but de présenter à l'utilisateur ce qu'il va travailler dans les autres phases, de le sensibiliser aux différents paramètres, à l'interface graphique et à la visualisation proposée ;
- la phase de correction ; elle permet d'apporter à l'utilisateur les éléments indispensables à une correction de ses productions ;

- la phase d'entraînement ; elle a pour but de consolider et d'automatiser les acquisitions précédentes.

4.1.3 Une rétroaction visuelle permise par une analyse vocale technique

Afin de mettre en place les aides visuelles destinées à fournir une rétroaction aux sujets non-entendants, une analyse des paramètres à rééduquer est indispensable. Cette analyse doit être fiable, suffisamment précise et très rapide puisqu'une rétroaction, quelle qu'elle soit, doit être la plus proche possible du "stimulus" pour avoir une réelle efficacité. Cette partie d'analyse vocale est prise en charge par un système de reconnaissance analytique multilocuteur de parole [Haton 98] et grâce à une carte DSP intégrée dans SIRENE. Cette carte DSP fournit une analyse de type cochlée artificielle qui se présente sous forme d'une batterie de filtres suivis de détection-intégration dont les paramètres sont issus de ceux de l'oreille humaine [Alinat 94, Alinat 97, Haton 98].

Les résultats de cette analyse sont traités par des modules correspondant à trois niveaux d'abstraction différents. Le premier niveau d'abstraction correspond à l'estimation des paramètres acoustiques, le second, à l'estimation des phones ainsi qu'à la localisation et à l'estimation de leur paramètre et le dernier niveau, à la reconnaissance c'est-à-dire la comparaison des phones produits par l'utilisateur avec les paramètres retenus pour chaque phone.

Maintenant que nous avons décrit succinctement le processus d'analyse des données, nous allons remonter plus en amont au niveau des données utilisées. La question à laquelle nous allons donc répondre dans ce paragraphe est : "quels sont les traits du signal retenus ?"

Lorsque l'exercice porte sur la voix, les données retenues vont être :

- la fréquence fondamentale ou F_0 ;
- le *voisement* c'est-à-dire l'énergie de friction par rapport à l'énergie totale. Ces données permettent au système de déterminer si la production du sujet est de la "voix" ou du souffle ;
- les variations de fréquence.

Lorsque l'exercice porte sur le souffle, les données retenues sont :

- l'énergie totale ;
- l'énergie de friction ;
- le pourcentage de friction dans l'énergie totale.

Lorsque l'exercice porte sur le rythme, le paramètre retenu est la durée des voyelles. En ce qui concerne l'intonation, on retient le fondamental des noyaux vocaliques.

Quant au problème de l'articulation des voyelles, on retient la durée et la fréquence des formants F_1 et F_2 . En effet, pour chaque voyelle, le canal vocal renforce les harmoniques du son fondamental qui correspondent à ses fréquences de résonance naturelles. Il existe un lien entre les caractéristiques acoustiques et physiologiques des voyelles. L'accroissement des valeurs de F_1 est en relation étroite avec l'accroissement de l'aperture. De même, F_2 s'abaisse lorsque l'on passe des voyelles antérieures aux voyelles postérieures. Dans la parole, les voyelles sont rarement prononcées isolément : elles subissent l'influence des phones voisins. Ainsi, on observe que les formants F_1 et F_2 se situent dans des zones qui se recouvrent partiellement, les zones de tolérance. Pour identifier une voyelle, l'analyse s'appuie donc sur ces zones de tolérance prédéterminées pour chaque voyelle.

Pour l'articulation des consonnes, on distingue les consonnes plosives des fricatives. Pour les premières, les données estimées sont la durée du *burst* (barre d'explosion), les lieux d'articulation (estimés selon des probabilités) et le mode articuloire, c'est-à-dire la nature de l'explosion. En effet, une plosive est une consonne dont la phase la plus importante de sa formation est l'occlusion momentanée du

passage de l'air qui produit une sorte d'explosion au moment de l'ouverture de l'occlusion. Pour différencier une plosive d'une autre, il faut se pencher sur la durée de l'explosion, ainsi que sur le lieu et le mode d'articulation. Pour les secondes (les fricatives), il faut déterminer leur compacité (la concentration relativement élevée de l'énergie dans une région étroite et centrale du spectre), la durée et la fréquence du formant fricatif ainsi que la nature de la friction (mode articulaire). Les fricatives sont caractérisées par un rétrécissement du passage de l'air qui produit un bruit de friction ou de frôlement en passant par la mince ouverture formée par l'organe articulant.

4.1.4 Bilan des services proposés par SIRENE

Comme nous l'avons vu précédemment, SIRENE permet de proposer une rétroaction visuelle, nécessaire à l'acquisition d'une parole intelligible et de bonne qualité, qui tente de pallier l'absence de retour auditif. Il est important de rappeler que ce système a été conçu en étroite relation avec des spécialistes-orthophonistes. Les données analysées, choisies pour le traitement des productions des sujets, ainsi que l'enchaînement rééducatif retenu dans le système (c'est-à-dire le graphe des exercices et les exercices eux-mêmes) ont été proposés par les spécialistes. Une validation experte peut donc être avancée pour asseoir ce système

La rétroaction proposée est constituée d'une visualisation des paramètres de la voix, de l'articulation et de la prosodie et également de conseils généraux de production. L'aide offerte à l'utilisateur de ce système est importante. Toutefois, SIRENE doit être utilisé en présence d'un spécialiste qui doit paramétrer le système, donner des conseils adaptés aux possibilités et difficultés du sujet, le guider encore dans sa rééducation ... Par conséquent, SIRENE ne peut permettre une utilisation réellement autonome, un entraînement régulier ou une vérification de la qualité de la parole du déficient auditif. En un mot, la présence de l'expert ou tout au moins ses recommandations et directives sont encore trop fréquemment indispensables. Par conséquent, l'autonomie réelle et la prise en charge de la rééducation par le sujet n'est pas réalisable dans l'état actuel de SIRENE.

Pour pallier ces limitations, nous proposons de coupler SIRENE avec un autre système : GEREV (*Guidage et Évaluation en Rééducation Vocale*). Nous discutons plus loin (page 88) le degré d'autonomie autorisé par l'ajout de ce système de guidage.

4.2 ... Puis vint GEREV !

4.2.1 GEREV : ses objectifs

Notre système a un objectif unique qui peut se traduire de trois manières différentes selon le point de vue adopté. Ceux-ci sont :

- de permettre au sujet une réelle prise en charge de sa rééducation ;
- de permettre une indépendance par rapport au spécialiste ;
- de combler ou de remplacer ponctuellement l'intervention du spécialiste.

Nous parlons ici de points de vue dans la mesure où nous envisageons successivement l'intérêt et l'objectif du système pour ses différents utilisateurs qui sont le sujet en rééducation et le spécialiste rééducateur. L'objectif décrit est maximal au sens où le système doit ou devrait permettre une automatisation maximale du guidage et donc de la prise en charge du sujet tout en n'étant pas forcément celui sélectionné dans un fonctionnement normal. En effet, il faut donner au sujet une autonomie et une indépendance maximale tout en permettant à tout moment l'intervention du spécialiste.

Le problème qui se pose maintenant est de savoir ce qu'impliquent ces objectifs. Concrètement, comment permettre une indépendance et une autonomie du sujet dans sa rééducation ?

Nous proposons pour ce faire de fournir des conseils adaptés à la fois aux productions du sujet et à ses possibilités et d'apporter un guidage de la rééducation en fonction des acquis du sujet. Ces deux propositions peuvent d'ailleurs varier en fonction du degré d'indépendance laissé au système, et donc au sujet, par rapport au spécialiste. Dans GEREV, nous proposons trois modes de fonctionnement qui diffèrent par l'indépendance du système par rapport au spécialiste. Dans ce manuscrit, nous développons essentiellement le mode de fonctionnement le plus automatisé, le plus indépendant de l'expert. Ainsi, lorsque nous parlons ou décrivons GEREV, nous sommes dans ce mode de fonctionnement. Il ne faut toutefois pas oublier qu'il en existe deux autres dont nous citons brièvement les spécificités dans les deux paragraphes suivants.

Le mode semi-dirigé permet au spécialiste de choisir spécifiquement les exercices devant être réalisés, indépendamment de l'enchaînement des exercices proposés antérieurement. Dans ce mode de fonctionnement, le sujet dispose de conseils et de recommandations, d'exercices à réaliser. Ces derniers ne sont cependant pas issus d'un choix du système informatique. Découlant de ceci, GEREV ne propose pas de tâche particulière. Ainsi, si une défaillance d'un paramètre censé acquis est détectée, aucune remédiation ou action sur ce paramètre n'est envisagée.

Quant au dernier mode de fonctionnement de GEREV, le mode libre, il consiste en un apport de conseils sans fournir de guidage, sans proposition de l'expert concernant les exercices à réaliser. Le sujet est libre de choisir les exercices qu'il veut cependant, toutes ces réponses, même si elles ne sont pas réexploitées au sein de cette session avec ce mode de fonctionnement, sont évaluées et viennent enrichir les connaissances dont le système dispose sur le sujet.

4.2.2 Oui mais comment ?

La satisfaction de ces objectifs contraint le système informatique à disposer d'informations issues des domaines complémentaires qui touchent la modélisation de l'utilisateur, l'évaluation des réponses, la modélisation des connaissances de référence, le guidage de l'utilisateur. Afin de prendre conscience des particularités et des difficultés inhérentes à notre travail, nous développons dans les paragraphes qui suivent les difficultés qui découlent à la fois des domaines précédemment cités et du domaine d'application choisi. Les solutions proposées à ces difficultés constituent une partie de notre travail. Ainsi, elles sont développées dans les chapitres suivants.

Le domaine d'application

Le domaine d'application de GEREV présente une certaine originalité par rapport aux systèmes d'EIAO¹⁸ existants, dans la mesure où les connaissances de référence ne sont pas aussi formelles que celles habituellement manipulées (géométrie, logique, règles grammaticales dans l'apprentissage d'une langue étrangère, ...).

Nos connaissances expertes ou de référence ont trait à un système complexe : la parole. La définition d'une parole intelligible, avant même de parler de bonne qualité, peut être énoncée de la manière suivante :

- elle découle des articulations qui doivent être proches des réalisations standards des phonèmes de la langue ;
- elle découle d'un débit qui doit être proche des valeurs moyennes ;
- elle découle d'un rythme qui ne doit pas comporter de variations brusques ;
- elle découle des modulations qui doivent être en accord avec les unités intonatives.

18. EIAO : Environnement Interactif d'Apprentissage par Ordinateur

Nous ne disposons pas de mesures quantitatives strictes au sens de connaissances particulières à atteindre comme par exemple "l'intensité doit être de 50 dB". Nous ne disposons pas davantage de règles d'utilisation de connaissances comme "si le paramètre *A* présente telle valeur *x* alors le paramètre *B* doit avoir telle valeur *y*". Par conséquent, la première difficulté à laquelle nous sommes confronté est le problème de la représentation et de la définition des connaissances cibles. En effet, qu'est-ce qu'une articulation proche des réalisations standards? ou qu'est-ce qu'un rythme sans variation brusque?

Ensuite lié à cette première difficulté, découle le problème du diagnostic au sens où nous l'avons présenté dans le chapitre 3 de la première partie. Comment évaluer un comportement vocal dans un contexte de connaissances expertes imprécises? Comment diagnostiquer ce comportement? Mais également, comment faire la synthèse de deux productions vocales ayant des paramètres quantitatifs différents? La difficulté de diagnostic et de synthèse de ces diagnostic entraîne un questionnement concernant le guidage. Quelle est la validité du guidage? Dans quelle mesure peut-on considérer qu'il est fiable et donc s'y référer pour guider le sujet en postulant son caractère adapté à l'état cognitif de l'utilisateur?

L'objectif et la population

L'objectif de SIRENE est un objectif rééducatif et non pas éducatif comme ce que nous avons pu voir dans les tuteurs existant (voir par exemple les sections 1.3 et 2.2). Cela a des implications au niveau du domaine de connaissances, mais aussi de la population visée et de ses possibilités.

En effet, la notion de rééducation contient l'idée de remédiation de déficiences et de limitations des capacités du sujet. Dans le cas de SIRENE, les sujets étaient initialement des enfants non-entendants qu'il fallait accompagner vers une oralisation. Pour les raisons que nous avons développées dans le chapitre précédent, cette oralisation est difficile à acquérir surtout lorsque l'enfant présente une surdité importante et que cette dernière est précoce. La version de SIRENE sur laquelle nous travaillons est destinée à de jeunes adultes qui peuvent présenter des profils de surdité et des réalisations vocales de qualité très variée.

La population visée est hétérogène. Classiquement, les tuteurs sont conçus pour une population bien particulière ayant des connaissances supposées bien délimitées. Dans un tuteur de géométrie, par exemple, la population cible correspond à un groupe d'âges, une classe d'école. Lorsque le tuteur s'appuie sur une classe telle que la 4^{ème}, les élèves ont des acquis présumés, des compétences relativement centrées autour d'une moyenne. Il est ainsi théoriquement plus aisé de "prévoir" les erreurs possibles ou tout au moins le domaine d'application et les limites du système. Au niveau de la rééducation, et d'autant plus pour la parole qui est un système très ample, les aptitudes¹⁹ des sujets sont très variées. Cela peut aller de la simple déficience d'un facteur à des combinaisons de déficiences de l'ensemble des facteurs. La difficulté ici, réside dans l'établissement d'un profil de l'élève et d'un diagnostic de réponses potentiellement extrêmes. On retrouve ici encore le problème de la modélisation du domaine de connaissance (connaissances élèves + connaissances expertes).

Le second problème de la rééducation est celui de la limitation des possibilités du sujet²⁰. Dans un système classique d'éducation, on connaît plus ou moins la fourchette de connaissances dans laquelle se trouvent les élèves et la cible qu'ils devraient pouvoir atteindre. Dans le cas qui nous intéresse, une fois que le niveau de connaissances, de compétences, est établi, ni le spécialiste ni même le sujet ne peuvent définir le degré de progrès potentiellement atteignable et encore moins le temps nécessaire à ce progrès. Effectivement, des limitations physiologiques peuvent empêcher par exemple l'amélioration de tel facteur ou de tel autre. Ainsi, le système doit pouvoir accepter, à un moment donné, une réponse de l'élève

19. Une aptitude est une caractérisation analytique élémentaire qui permet de différencier des individus sur une même conduite (définition issue du Grand Dictionnaire de Psychologie).

20. Nous préférons dans le domaine de la rééducation la notion de sujet à celle d'élève. Ces deux termes recouvrent néanmoins des réalités proches voire confondues.

même si celle-ci n'est qualitativement pas acceptable. Le système doit pouvoir conseiller, aider l'élève en fonction de ses possibilités sans rejeter systématiquement une production hors norme, différente de celle à atteindre. Ceci est également un point important et un objectif qu'il faut impérativement tenir sous peine de quoi le système ne serait pas utilisable dans un fonctionnement normal. Toutefois, cela soulève bon nombre de difficultés en ce qui concerne l'adaptation des conseils et du guidage de l'utilisateur telles que comment et quand décider qu'une réponse ou une compétence du sujet est satisfaisante ?.

L'apprentissage et la prise en compte du temps

Dans une rééducation, le facteur temps est à prendre en considération. Le nombre de sessions ou le temps nécessaire à la maîtrise et à la consolidation (automatisation) peuvent être assez conséquents, c'est-à-dire de l'ordre de plusieurs mois, voire de plusieurs années. Sur un laps de temps aussi grand, il est hautement probable que l'on observe des variations de compétences entre les différentes sessions. Les difficultés ici sont celles relatives au traitement du bruit, à la prise en compte du temps, à la synthèse d'informations potentiellement hétérogènes, afin de rester cohérent avec l'état cognitif de l'utilisateur.

Avant de conclure ce paragraphe, nous proposons d'expliquer sommairement les notions de bruit et de synthèse des données issues de l'interaction système-utilisateur. Classiquement, le bruit est défini comme un ensemble de données non pertinentes et aléatoires qui vont gêner et perturber l'identification ou la discrimination de la situation réelle. Dans un système éducatif ou rééducatif, la difficulté est de déterminer la ou les (parties de) réponses qui constituent un reflet de l'état cognitif du sujet, et par conséquent d'éliminer ou de minimiser tout au moins l'effet des réponses non pertinentes pour l'élaboration d'un profil cognitif du sujet. Le profil obtenu doit permettre au système de guider au mieux les interactions avec le sujet. Il est ainsi fondamental de disposer d'informations cohérentes et pertinentes sur le sujet. Mais comment, objectivement, peut-on discriminer une donnée ou réponse non pertinente d'une réponse illustrant une modification quantitative ou qualitative de l'état du sujet ? C'est à ce niveau que se situe précisément la difficulté de la notion de bruit. Nous exposons ultérieurement (page 134) nos propositions concernant cet aspect.

En ce qui concerne l'étape de synthèse, elle consiste en fait à intégrer les informations pertinentes sur l'état cognitif du sujet que l'on a recueillies à l'instant t à celles recueillies précédemment. Cette intégration n'est pas un mécanisme élémentaire ; en effet, le résultat de ce mécanisme doit offrir au système des données cohérentes qui vont lui permettre de guider le sujet. Une fois encore, la difficulté réside dans l'établissement d'un profil cohérent. Comment gérer des évolutions de connaissances entre deux réponses recueillies à des moments différents ? Dans la suite du manuscrit, des propositions sont exposées concernant ces mécanismes de synthèse (page 132).

Bilan

Pour une population de non entendants ou de déficients auditifs, l'acquisition et le maintien d'une certaine qualité de voix est réalisé par une rétroaction fournie habituellement par l'orthophoniste, spécialiste et interlocuteur privilégié, ainsi que par l'entourage familial lorsque ce dernier est normo-entendant. Celle-ci peut ne pas être objective lorsqu'elle émane de l'entourage du sujet ; effectivement, les proches peuvent ne pas réagir suffisamment à une défaillance de la qualité de la voix dans la mesure où ils sont accoutumés à un certain niveau d'intelligibilité et plus aptes que d'autres à comprendre le sujet. Par conséquent, il est essentiel pour ces adultes et adolescents de disposer d'un moyen de "gestion de leur propre voix" qui présente à la fois une certaine objectivité de la rétroaction qui soit utilisable et qui présente une disponibilité importante. Ce moyen, un système informatique qui est ici SIRENE, doit permettre progressivement une autonomie du sujet en facilitant la communication dans le milieu familial ou professionnel. Pour ce faire, SIRENE n'est pas utilisable dans son état actuel ; même s'il visualise les

paramètres vocaux et fournit ainsi une rétroaction, il ne dispose d'aucun moyen de guidage, de conseils, d'évaluation qui lui permette d'être utilisé de manière autonome. C'est pourquoi, nous adjoignons un système, GEREV, qui prend en charge cette tâche de guidage de l'utilisateur.

Comme nous avons pu le voir précédemment, la particularité de notre travail, au niveau du système à mettre en place, repose à la fois sur l'apprentissage de connaissances non formelles et imprécises par des utilisateurs de niveaux différents et sur la nécessité de prendre en compte les limitations et l'évolution des sujets tant dans les conseils que dans le guidage que le système doit proposer. Ces aspects recouvrent différents domaines de recherche dans un système interactif d'apprentissage :

- la représentation des connaissances :
- l'évaluation des réponses du sujet ;
- la synthèse des connaissances ;
- le guidage.

Ces niveaux constituent les deux prochains chapitres du manuscrit dans lesquels nous développons les aspects théoriques de nos propositions mais également leur mise en place technique dans GEREV. Toutefois, avant de clore ce chapitre introductif de la seconde partie de notre exposé, nous tenons à présenter l'architecture de GEREV ainsi que ses particularités.

4.2.3 GEREV : son architecture

GEREV : une macro-structure de tuteur

GEREV est un tuteur classique [Nicaud 88] qui contient un module de l'expert, un module pédagogique et un module de l'élève. Ces trois premiers modules sont développés ultérieurement dans les chapitres 5 et 6. GEREV possède également un module interface mais qui n'est pas destiné à ce que l'on a appelé jusqu'à maintenant l'utilisateur ou le sujet²¹. Notre système vient se surajouter à SIRENE et vise à proposer une aide adaptée à l'utilisateur. Cette aide est fournie au travers de conseils, de guidage, d'encouragements ... ; l'aide est fournie au sujet lors de l'utilisation de SIRENE. Le fonctionnement de GEREV ne vient toutefois pas se substituer au système originel qui est SIRENE. L'utilisateur ne perçoit pas l'existence de deux systèmes différents : il travaille sur SIRENE, utilise l'interface de SIRENE et reçoit une aide dans SIRENE par l'intermédiaire de GEREV.

L'interface de GEREV dont une vue générale est proposée sur la figure 4.4 est dédiée et uniquement accessible au spécialiste. Elle a pour vocation de recueillir les données concernant les utilisateurs telles que leur état civil, un descriptif de leur déficit, ... , et de permettre la consultation ou la modification un profil d'utilisateur. Par le biais de cette interface, le spécialiste peut intervenir en modifiant le guidage proposé, en consultant l'historique, en ajustant le diagnostic et le niveau de l'utilisateur, en considérant comme optimal le niveau atteint par un sujet pour un paramètre donné.

GEREV : un système espion ou épiphyte ?

GEREV est un système qui ne se substitue pas à SIRENE mais qui le complète en offrant quelques fonctionnalités supplémentaires comme nous le schématisons sur la figure 4.5. Il doit donc être compatible avec SIRENE. Deux options d'implantation étaient possibles ; l'une était de concevoir un système qui incorpore SIRENE comme une sorte de module, alors que l'autre était de proposer deux systèmes indépendants. Nous avons opté pour des raisons de facilité d'implantation, mais aussi de généralité des

21. Un utilisateur ou sujet est la personne qui, dans notre système, vient rééduquer sa voix. On le distingue ici du spécialiste qui va utiliser le système comme médium et outil de rééducation

FIG. 4.4 – Vue d'un des panneaux de l'interface de GEREV

relations, de gestion des tâches et d'adaptabilité des systèmes entre GEREV et SIRENE pour la seconde possibilité.

Le principe général de notre système s'inspire directement des travaux sur les *systèmes épiphytes* [Pachet 96, Giroux 95]. Dans les architectures épiphytes, on considère les systèmes conseillers comme des extensions non perturbatrices d'applications informatiques, capables de s'adapter à leur comportement. Le terme épiphyte, issu de la botanique, désigne en effet une classe de plantes qui vivent en se greffant sur des plantes hôtes sans leur porter préjudice (par opposition aux prédateurs et parasites). Par analogie, les systèmes épiphytes sont des systèmes informatiques chargés d'observer et d'analyser l'activité d'un système informatique hôte.

D'un point de vue technique, les systèmes épiphytes sont basés sur un échafaudage de plusieurs concepts. Au niveau le plus bas, une couche dite d'espionnage permet de récupérer les informations brutes du système observé. Ces informations sont analysées par rapport à un arbre de tâches. L'analyse produit un ou plusieurs conseils qui sont ensuite eux-mêmes traités avant d'être présentés à l'utilisateur. Ces deux niveaux sont traités dans les deux paragraphes suivants.

Premier niveau : les espions Des objets particuliers, appelés "espions", se greffent sur les objets clés du système hôte, et interceptent les messages pour les renvoyer au système d'analyse.

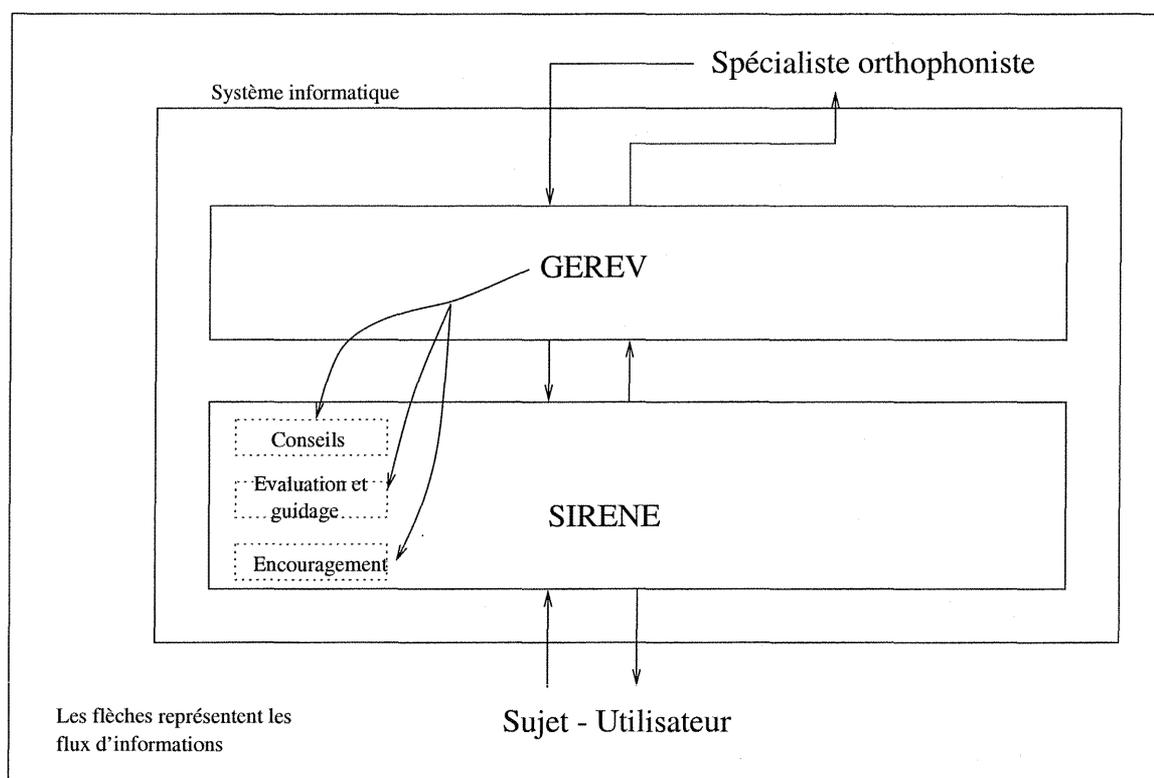


FIG. 4.5 – Relations entre GEREV, SIRENE et ses utilisateurs

Second niveau : reconnaissance de plans et interprétation de l'arbre des tâches. La construction de systèmes conseillers repose sur deux postulats :

1. donner des conseils pertinents implique de connaître les intentions de l'utilisateur ;
2. connaître les intentions de l'utilisateur requiert une analyse des séquences d'actions temporelles.

Or, la recherche en reconnaissance de plans montre clairement que le problème de l'analyse n'a pas de solution en général. Une des idées explorée pour produire des conseils a été de combiner les deux étapes - analyse des actions et production effective du conseil - en un seul et même mécanisme [Pachet 96]. Ceci permet d'orienter l'analyse vers la production de conseils, son but ultime, d'où une analyse moins fine que ce que peuvent produire certains formalismes, mais dont le résultat est directement exploitable.

GEREV propose toutefois une organisation différente de celle des systèmes épiphytes classiques. En effet, il n'existe pas ici de phase de reconnaissance de plan ou de reconnaissance d'intention du locuteur. GEREV effectue un recueil des données, c'est-à-dire du résultat quantitatif des traitements réalisés dans SIRENE ce qui correspond donc à la couche espion, les analyse (les qualifie, les catégorise, ce qui correspond en fait à la couche de reconnaissance de connaissances justes ou erronées) puis propose des conseils, une rétroaction et un guidage pour l'action prochaine à mettre en œuvre. Le nombre de couches envisagées et leurs fonctions coïncident bien avec celles mises en œuvre dans les systèmes épiphytes. Ce qui diffère, c'est le processus de reconnaissance de la connaissance utilisée (reconnaissance de plan).

L'utilisation du concept épiphyte que nous mettons en œuvre est également intéressante et utilisable dans des domaines autres que ceux généralement considérés [Giroux 95, Pachet 96].

Ainsi, la mise en place de notre système n'induit pas de modification dans le fonctionnement de SIRENE. GEREV agit sur SIRENE comme le ferait un spécialiste, c'est-à-dire en donnant une estimation qualitative de la production du sujet, en lui prodiguant des conseils adaptés à son niveau et en sélectionnant la tâche suivante (une réalisation dans un exercice ou un exercice).

De plus, comme nous l'avons signalé dans les objectifs de notre système, dans la section 4.2.1, plusieurs modes de fonctionnement sont proposés. La distinction entre ces modes concerne le degré d'autonomie du système par rapport au spécialiste. Cette autonomie peut être de totale à inexistante. Selon le choix du mode de fonctionnement, le système gère et propose, à des degrés divers, à l'utilisateur l'évaluation des productions, les conseils et le guidage. Toutefois, quel que soit le choix effectué, la couche espion fonctionne en permanence ; elle recueille des données sur le comportement de l'élève et les enregistre. Ceci permet ainsi à la fois un passage aisé entre les différents mode de fonctionnement du système en tenant compte des réalisations antérieures de l'utilisateur, et une mise à jour d'un profil. Cette dernière présente ainsi l'intérêt de fournir un suivi du sujet par l'expert.

GEREV sans SIRENE ? La réponse à cette question ne peut être que GEREV est directement transposable sur un autre logiciel puisqu'il utilise des connaissances propres au domaine d'apprentissage de SIRENE. Toutefois, l'idée originelle de GEREV était une portabilité importante vers d'autres systèmes éventuellement. Par conséquent, même si cela n'a pas été réalisé durant ces travaux, sa portabilité, dans certaine condition d'adaptation est envisageable. En effet, les mécanismes de guidage, d'évaluation qui constituent le coeur de cette application sont tout à fait réutilisable et non spécifique à SIRENE.

4.2.4 GEREV : ses particularités

Outre les particularités que nous avons déjà citées (pages 88 et 91) concernant son architecture, mais aussi son domaine d'application au sens large, GEREV va pouvoir proposer un système d'évaluation des connaissances à plusieurs niveaux. En effet, nous proposons d'évaluer des connaissances que nous appelons en contexte et d'autres hors contexte. Techniquement, cela revient à espionner à la fois des connaissances faisant directement l'objet de la rééducation et celles considérées comme acquises mais ne faisant pas directement l'objet du travail rééducatif en cours. Chaque exercice met spécifiquement en œuvre un paramètre de la parole. Un exercice correspond à la rééducation de ce paramètre. SIRENE propose pour ce faire une visualisation adaptée. La rééducation de ce paramètre constitue la tâche principale du sujet. Des conseils, des évaluations et recommandations sont fournies au sujet à propos de cette tâche et des performances obtenues.

Cependant, la production vocale ne résulte pas d'un et d'un seul paramètre. Il nous a semblé indispensable de contrôler ou de surveiller les autres paramètres intervenant dans la production vocale. Une restriction à cette analyse a été mise en place : seuls les paramètres ayant donné lieu à une rééducation ou considérés comme maîtrisés sont susceptibles d'être traités comme tâche secondaire ou paramètre secondaire²². Ces notions de tâches ou de paramètres secondaires sont issues du Postulat 1 que nous formulons de la manière suivante :

Postulat 1 : lorsque le sujet réalise une tâche et travaille spécifiquement un paramètre, il porte son attention sur ce paramètre. Cette tâche peut donc être considérée comme primaire. Les autres paramètres sont alors "moins surveillés" et sont considérés comme secondaires.

22. A une tâche particulière correspond un paramètre. Nous distinguons la tâche et le paramètre en fonction du niveau d'analyse où nous nous plaçons ; lorsque notre intérêt se porte sur l'acquisition de compétences, nous nous situons au niveau du paramètre alors que lorsque notre intérêt se porte sur l'exercice ou sa réalisation, nous nous situons au niveau de la tâche.

Plus la tâche primaire est complexe pour le sujet, plus elle va mobiliser d'attention. Par définition, ici, cette tâche primaire est coûteuse en ressources attentionnelles puisque nous sommes dans un contexte rééducatif et donc dans un contexte de connaissances non acquises. La production des autres paramètres, le contrôle des autres tâches, ne bénéficient que de l'attention restante, c'est-à-dire peu d'attention. Par conséquent, le postulat (Postulat 2) sous-jacent à notre système est :

Postulat 2 : l'état réel des paramètres est celui appréhendé au travers des paramètres et tâches secondaires puisque l'attention du sujet se porte sur une autre tâche et limite ainsi, un contrôle de ces tâches secondaires. L'état du paramètre secondaire est ainsi non biaisé, plus "pur".

A notre sens, l'estimation et la performance obtenues aux critères secondaires est celle qui présente ainsi le plus de fiabilité. En effet, la performance issue de ces paramètres est la plus proche de l'état réel des compétences du sujet dans la mesure où l'effet de l'attention étant minimal, on observe l'état réel d'automatisation de la compétence.

Ainsi, non seulement nous effectuons deux évaluations que nous appelons en contexte et hors contexte mais en plus, nous accordons d'avantage de poids à celle réalisée hors contexte. Nous développons ce point ainsi que sa mise en œuvre technique au travers des sections 6.3.2 et 7.1.2 traitant du diagnostic et du guidage.

4.2.5 GEREV : un automate de fonctionnement

Nous proposons dans cette section de présenter l'automate de fonctionnement de notre système. Celui-ci a pour fonction de fournir une vue globale des fonctionnalités de GEREV. Nous nous appuyons sur cette schématisation pour situer les principes de GEREV abordés dans les chapitres suivants²³.

Une vue générale du système GEREV

Sur la figure 4.6, une présentation générale de GEREV est exposée. Elle permet d'avoir une première approche à la fois structurelle et fonctionnelle du système. En effet, on découvre les fonctions de GEREV (diagnostic, guidage, établissement des profils) mais aussi les structure manipulées (bases de données et systèmes de traitement) et les liaisons (les flux de données et les commandes échangées) que ces dernières entretiennent les unes avec les autres.

Au niveau des informations utilisées par GEREV pour constituer un programme pédagogique adapté ou informer le pédagogue de l'évolution des connaissances de l'élève, le système dispose de trois bases de données qui sont :

- un historique des sessions dans lequel toutes les productions sont conservées pour tous les paramètres, et ceci par session ;
- le profil de l'élève. Celui-ci est constitué d'une évaluation qualitative et quantitative (moyenne pondérée) pour chaque paramètre manipulé par l'élève. Ce sont sur ces informations issues du profil que les systèmes de traitement de GEREV élaborent l'enchaînement pédagogique, les conseils, les aides ... adaptés à l'utilisateur ;
- le graphe des tâches. Un exercice ne peut être effectué, dans un mode de fonctionnement dirigé par le système, que dans le cas où toutes les connaissances préalables ou tous les prérequis sont satisfaits. Ainsi, l'enchaînement des exercices peut être représenté au travers d'un graphe des tâches. GEREV s'appuie sur une telle base des connaissances pour mettre en œuvre ses traitements.

23. Le chapitre 5 (page 103), le chapitre 6 (page 115) et le chapitre 7 (page 137). La réalisation informatique est quant à elle déclinée dans le dernier chapitre de cette partie (le chapitre 8 à la page 8).

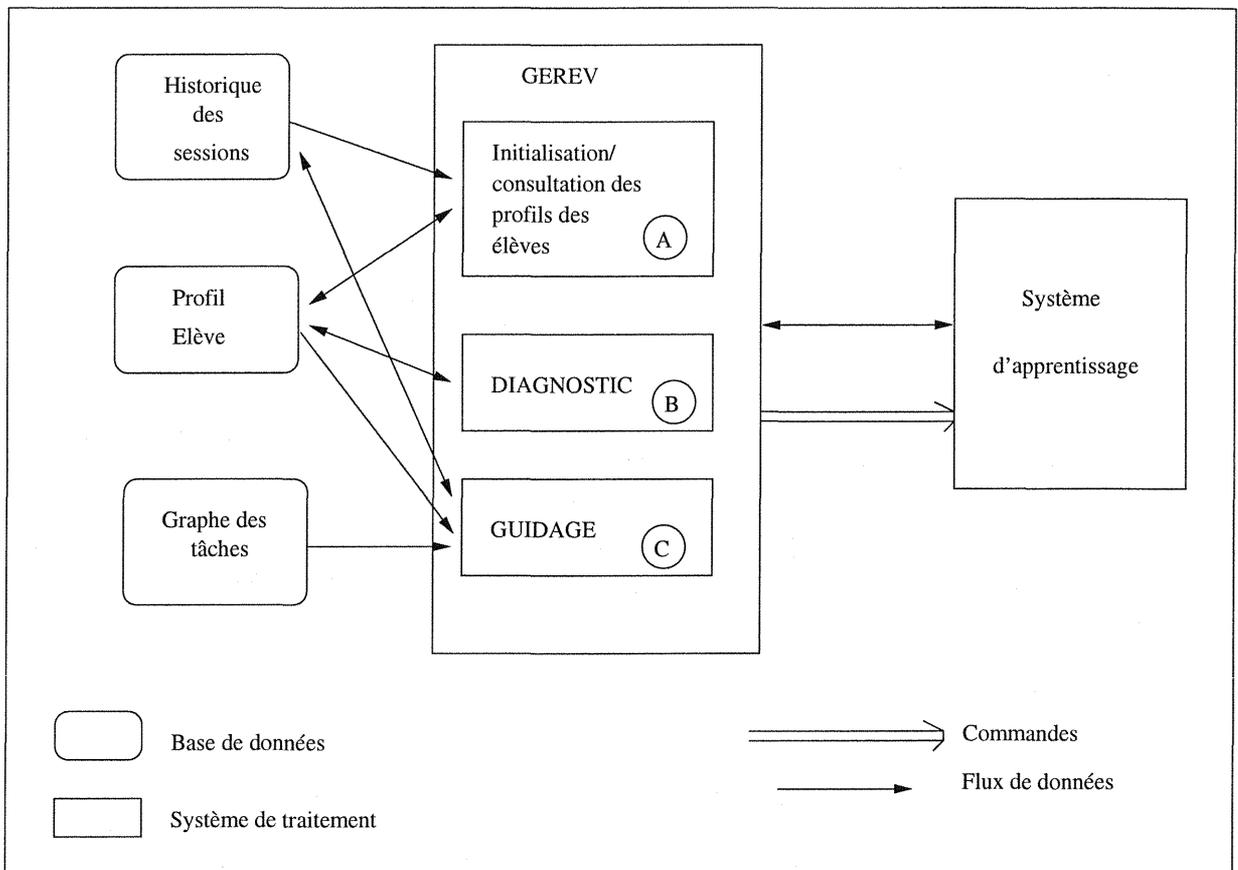


FIG. 4.6 – Schéma général de présentation du système GEREV

Les objectifs de GEREV sont d'agir sur un système d'apprentissage afin de proposer à son utilisateur, l'élève, une aide pédagogique permettant des acquisitions des connaissances dans des conditions optimales, c'est-à-dire adaptée aux possibilités et niveaux de compétences actuels de l'élève. Préalablement à une quelconque action, un flux d'informations entre GEREV et le système d'apprentissage est nécessaire afin que GEREV connaisse l'état actuel dans lequel se trouve le système d'apprentissage. Ce flux d'information doit être constant dans la mesure où le processus est dynamique et non uniquement réactif.

GEREV influence, de par ses objectifs, sur le système d'apprentissage. Pour agir, il utilise un certain nombre de commandes qui permettent de sélectionner et de présenter un exercice à l'élève, qui fournissent de l'information ...

Quant aux systèmes de traitements de GEREV, nous les développons dans la suite à l'aide de deux autres schémas.

Le premier porte sur le système d'initialisation/consultation des profils élèves. Il constitue la partie que nous avons nommée A sur la figure 4.6.

Le second porte sur les systèmes qui vont mettre en œuvre le guidage et les évaluations.

Le système d'Initialisation/consultation des profils

Dans GEREV, deux applications cohabitent. L'une d'elle, l'application-Expert, gère prioritairement la création et la consultation des profils-Patient. Cette gestion est assurée au travers d'une interface dont une vue est présentée sur la figure 8.1 de la page 156. C'est le fonctionnement de cette application, de

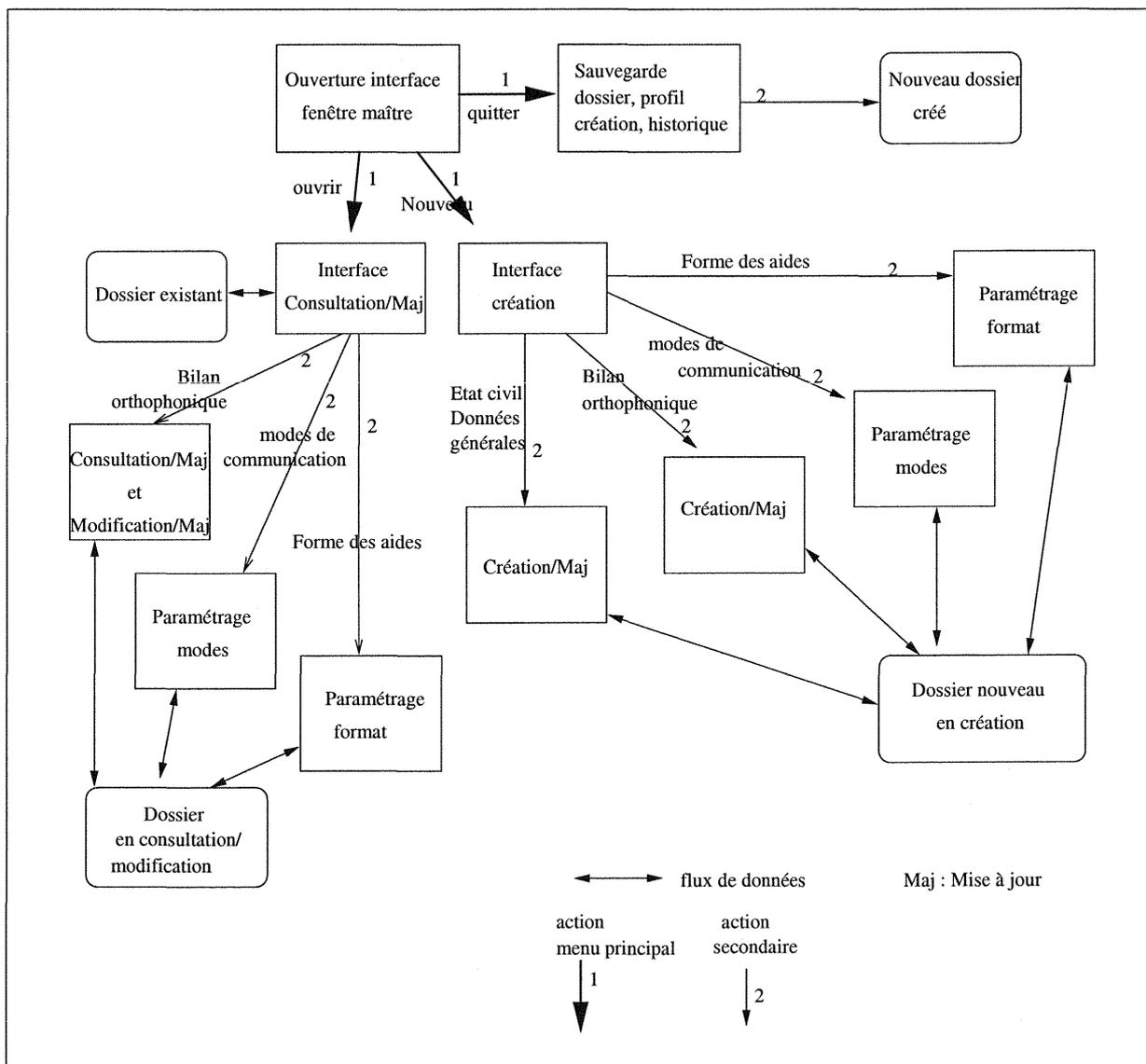


FIG. 4.7 – Développement du cadre A : système d'Initialisation/Consultation des profils

cette interface qui constitue la cadre A de la figure 4.6 et que nous décrivons sur la figure 4.7.

L'utilisation de l'interface expert nous permet schématiquement de réaliser trois fonctions :

- une ouverture d'un dossier existant dans une optique qui peut être de modification ou de consultation du dossier-patient. La consultation ou la modification peut alors porter, dans un second temps, sur les données attachées aux paramètres, sur les modes de fonctionnement de GEREV (état de fonctionnement dirigé, semi-dirigé, libre) et sur le format, c'est-à-dire la forme des aides retenues préférentiellement pour ce patient ;
- une création d'un dossier-patient. Dans celle-ci, l'expert peut entrer des informations plus ou moins nombreuses en ce qui concerne l'état civil et les données générales sur le patient, sur le bilan orthophonique, sur le mode de fonctionnement du système et sur les aides :
- quitter le système qui conduit à la sauvegarde du dossier et à la création d'un historique.

Sur le schéma que nous présentons (figure 4.7), nous n'avons pas représenté les retours existants et ceci afin de ne pas alourdir davantage le schéma.

Les systèmes de Diagnostic et de guidage de l'élève

Alors que pour les problèmes d'initialisation et de consultation de profil, c'était l'application-Expert qui était impliquée pour le guidage et l'évaluation, c'est l'application-Patient qui recèle les systèmes de traitement nécessaires à la mise en œuvre de ces processus. La figure 4.8 a pour ambition de donner une vue générale du fonctionnement des processus de guidage et d'évaluation. Cette vue reste générale et donc partielle. Elle sera ultérieurement détaillée et complétée dans les chapitres traitant de l'évaluation (chapitre 6), du guidage (chapitre 7) et de l'implantation informatique (chapitre 8).

Le lancement de l'application-Patient provoque l'ouverture de l'interface élève ou patient. Cette interface est "virtuelle" dans la mesure où GEREV est transparent pour l'élève. Ce que voit l'élève en utilisant le logiciel de rééducation de sa voix, c'est l'interface de SIRENE dans laquelle des fenêtres de GEREV apparaissent. La première de celles-ci a pour fonction de permettre au système de vérifier l'identité du patient au travers de la saisie d'un mot de passe. Dans le cas où l'identité annoncée, le mot de passe et le profil utilisateur coïncident, une session d'apprentissage est ouverte. Elle débute par la sélection d'un exercice et d'une instance particulière de cet exercice. Ensuite, le système récupère la réponse de l'élève ; il l'évalue, propose éventuellement des conseils et un renforcement positif ou négatif adapté à l'état estimé de la connaissance évaluée. Il met à jour le profil et l'historique du patient. Le système vérifie ensuite si les conditions d'arrêt du système sont satisfaites. Dans le cas contraire, il sélectionne à nouveau un exercice et une instance à l'intérieur de ce dernier.

Pour exprimer plus précisément le fonctionnement des processus, il faudrait ajouter une description des conditions d'arrêt, une description des différents niveaux d'évaluation, une sélection des renforcements proposés ...

Ceci ne nous est pas paru essentiel pour l'appréhension globale des mécanismes dont les principes vont ensuite être développés. Nous n'entrons pas davantage dans la complexité de GEREV.

4.2.6 GEREV : bilan

GEREV est un projet qui a la volonté de faire cohabiter des objectifs complexes :

- offrir une autonomie par rapport au spécialiste ;
- adapter les conseils à l'utilisateur ;
- permettre au spécialiste de suivre et d'intervenir dans l'enchaînement des exercices et dans le diagnostic des évolutions du sujet ;

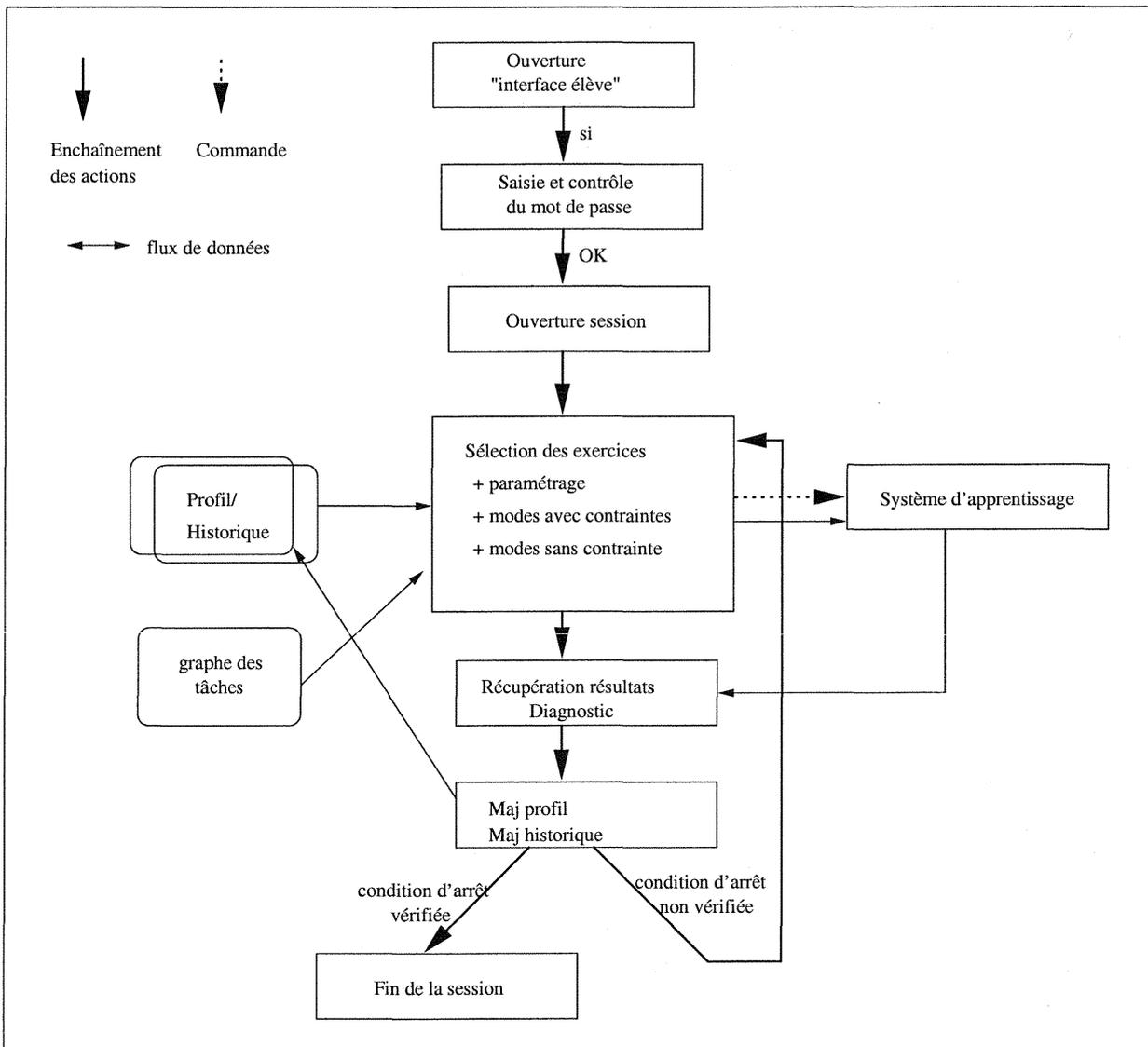


FIG. 4.8 – Développement du cadre B et C : système d'évaluation et de guidage

– réutiliser le logiciel de traitement des données existant, SIRENE.

Ces différents points donnent lieu à un développement dans les prochains chapitres. En effet, nous traitons successivement du problème de la représentation des connaissances, puis nous envisageons l'aspect diagnostic et synthèse des informations et finalement, nous nous penchons sur le guidage c'est-à-dire sur ce que nous faisons des informations issues du diagnostic pour améliorer l'interactivité avec le système.

4.3 Un modèle théorique : Pourquoi? Lequel?

Nous avons présenté dans la section précédente le système informatique GEREV au travers de ses objectifs et fonctionnalités. Pour mettre en place un tel système capable de proposer un guidage adapté à l'utilisateur tant au niveau des conseils à lui fournir qu'à celui de l'enchaînement rééducatif à offrir, nous

nous sommes abreuvés à deux sources distinctes qui sont :

- le domaine Informatique pour modéliser et implanter les différents types de connaissances nécessaires à un tel système ;
- le domaine des Sciences Humaines et plus particulièrement de la Psychologie Cognitive pour ce qui touche l'utilisateur et sa prise en compte par le système.

L'objectif de cette combinaison est de permettre une cohérence globale au système informatique et une efficacité accrue par une prise en compte du fonctionnement cognitif de l'utilisateur et des mécanismes d'apprentissage en œuvre lors de l'interaction système-utilisateur. Toutefois, comme nous l'avons brièvement évoqué en introduction de cette thèse, la combinaison de ces approches n'est pas sans soulever des difficultés tant au niveau de leurs méthodologies qu'à celui de leur objectif. Nous les présentons après avoir exposé le modèle théorique et les principes sous-jacents de GEREV.

4.3.1 Les principes psychologiques sous-jacents de GEREV

Le modèle d'acquisition de connaissances sous-jacent dans GEREV est à rapprocher d'ACT* d'Anderson [Anderson 85a]. En effet, nous envisageons ce processus en termes de constructions quantitatives dans un premier temps qui, suite à de multiples essais, va conduire par extraction des propriétés liées aux différentes situations à un niveau de connaissances abstrait, et donc à une construction de type prototypique capable d'être cependant particularisée. Entre ces deux états, nous discernons trois niveaux d'acquisition de connaissances qui sont :

1. le premier niveau : un apport quantitatif de connaissances. Cet apport est stocké en mémoire tel quel, c'est-à-dire que la situation (le problème) est associée à la réponse (le comportement produit) sans que cette dernière ait subi de modifications qualitatives ou que le système de traitement ait extrait des propriétés générales de la situation ;
2. le second niveau : la construction d'un modèle de la réponse dans un contexte très proche (généralisation de la solution) ;
3. le troisième niveau : construction d'un prototype et des particularités ou propriétés fondamentales en fonction des contextes variés ; c'est-à-dire qu'ici, on assiste à un nouveau niveau d'abstraction pour la constitution du prototype et en parallèle à une spécialisation en fonction des situations qui va par ailleurs modifier le prototype général (il va en fait permettre en quelque sorte d'affiner le prototype en séparant ce qui est propre au prototype de ce qui relève d'une situation).

Ces trois niveaux impliquent des traitements et des ressources différentes pour le système²⁴.

Le premier nécessite, au niveau du traitement, peu de capacité dans la mesure où les réponses ne sont pas réellement traitées. Elles sont associées à la situation et mémorisées. Par conséquent, même si elles sont peu coûteuses en ressources traitement, elles le sont nettement plus en ressources mémoire. Ainsi, le niveau attentionnel requis pour réaliser un apprentissage dans un tel stade d'acquisition est relativement élevé. Il est alors assez difficile pour le sujet de réaliser cet apprentissage particulier et de disposer de ressources attentionnelles suffisantes pour contrôler d'autres phénomènes indirectement liés à l'apprentissage. L'accessibilité à des informations issues d'un tel niveau de traitement est relativement lourde dans la mesure où les données ne sont pas structurées ou rattachées à des contextes et des connaissances générales. Elles sont des données et non des connaissances en tant que telles. Toutefois, lorsqu'elles viennent d'être activées ou enregistrées, le temps ou la vitesse d'accès est tout à fait négligeable.

Le second requiert au niveau du traitement de fortes ressources lors de son élaboration puisqu'ici, le système va construire un premier prototype à partir de la collection des réponses dont il dispose dans

24. Ce que nous appelons ici système est à rapporter au sujet et plus particulièrement à sa capacité de traitement, de mémorisation ...

des contextes très proches. Au niveau des ressources mémoire, on assiste à une diminution de la capacité requise puisque ce qu'il faut mémoriser est relativement léger, un prototype ou un modèle général de la réponse à fournir dans un contexte particulier. Toutefois, ce niveau n'est pas forcément à réaliser en temps réel. En effet, la construction de ce modèle ne nécessite pas son application en parallèle ni son utilisation immédiate. Il est tout à fait réaliste de penser que cette étape se déroule "hors-ligne". Si ce n'était pas le cas, il est à penser que cette construction qui correspond à une structuration des données peut entraîner des erreurs et des sauts qualitatifs importants dans la performance observée. En effet, la structuration s'opère en extrayant des propriétés des données qu'elles pensent pertinentes. Si le caractère pertinent s'avère non justifié, les réponses issues de ce modèle peuvent donner lieu à des performances différentes qualitativement de celles obtenues sans modèle et relevant d'un processus de renforcement (avec des valences positives ou négatives). Dans ce cas, le sujet constate une modification de la performance et adapte son comportement en conséquence : soit il conserve ce modèle qui a permis d'obtenir de meilleures performances soit il restructure les propriétés afin d'obtenir un modèle permettant une performance au moins équivalente à celle hors modèle. L'accessibilité à un tel modèle est grandement améliorée par rapport au niveau d'acquisition précédent. Le système dispose de points d'entrée de haut niveau : le prototype et son contexte d'utilisation.

Le troisième niveau correspond en fait à une nouvelle étape d'abstraction à partir du second niveau en généralisant ou en multipliant les contextes dans lesquels les données sont rencontrées et interviennent. Le système va reconstruire pour ce niveau un prototype qui regroupe les propriétés communes de la connaissance manipulée auquel des prototypes plus spécifiques sont incorporés pour rendre compte des particularités qu'engendrent les contextes ou les situations variées. La constitution de ce dernier niveau d'acquisition peut être assez coûteuse au niveau des ressources mais, comme précédemment, peut être réalisée hors ligne. L'acquisition est optimale et réellement efficiente lorsqu'elle atteint ce niveau d'abstraction. L'utilisation d'une connaissance à ce niveau d'abstraction est attentionnellement négligeable. Celle-ci a été catégorisée, traitée et prévue dans des contextes variés. Sa mise en œuvre devrait quasiment correspondre à l'application d'une procédure (même si nous ne postulons aucune procéduralisation de la connaissance au fur et à mesure de l'abstraction). Dans ce modèle d'acquisition de connaissances, les connaissances ont le même statut quelque soit le niveau considéré. Il n'y a pas cette notion de connaissance déclarative lors de l'initialisation de l'acquisition qui se procéduralise au cours de l'acquisition. Il y a plutôt une donnée qui va être rencontrée plusieurs fois dans un même contexte et dans des contextes variés. Cette répétition donne lieu, dans un but d'économie des ressources, à la constitution de prototypes plus ou moins abstraits selon les contextes.

Dans une approche psychologique, la première étape est de fixer la cadre théorique dans lequel l'étude se situe. Cela permet d'avoir un cadre de référence qui facilite en fait l'analyse que l'on va faire du phénomène. Ici, notre travail se situe dans un courant de type cognitivisme. Nous allons nous intéresser aux opérations intellectuelles ou cognitives internes des sujets. L'intérêt et le modèle portent plus particulièrement sur les processus d'acquisition de connaissances. Nous avons élaboré un modèle qui s'inspire largement des travaux d'Anderson [Anderson 85a]. A partir de ce modèle, nous établissons des postulats, des hypothèses sur ce que l'on devrait observer (l'élaboration d'hypothèses théoriques que l'on opérationnalise au travers des expérimentations constitue la seconde étape). Si l'expérimentation de ces hypothèses ne permet pas d'invalider le modèle, alors le modèle proposé est temporairement accepté. L'invalidation du modèle est réalisée au travers de propositions et de descriptions expérimentales qui permettent d'obtenir des résultats que l'on analyse qualitativement et statistiquement (l'analyse statistique des résultats coïncide à la troisième étape). Si cette invalidation n'a pas lieu, on retourne au modèle ou à la théorie et on recommence le processus (opérationnalisation et test d'hypothèses).

4.3.2 Difficulté de combinaison de l'approche psychologique et informatique

Dans une approche Informatique, le processus est différent ; on considère les contraintes en fonction du problème qui se pose. Ces contraintes sont généralement de type :

- quelle configuration matérielle et logicielle dois-je utiliser pour remplir le cahier des charges ?
- quel est le ou les langages de programmation le(s) plus adapté ?

Une fois cette première étape résolue, on considère le formalisme adéquat pour l'implantation du système. Puis de cela, on va extraire des concepts nouveaux, des théories.

L'approche Informatique est encore trop souvent conçue comme un processus de type *bottom up* ou dirigée par les données même si, en théorie on insiste fortement sur la nécessaire prise en considération d'un niveau "théorique" alors que l'approche Psychologique est plutôt dirigée par le modèle ou de type *top down*.

Outre le fait que l'objet d'étude de ces deux disciplines est différent, l'approche qu'ils mettent en œuvre sur un domaine est radicalement contradictoire [Mendelsohn 95].

Pour résoudre cette difficulté, nous sommes parti du modèle théorique psychologique que nous avons précédemment décrit avons considéré que ce dernier ainsi que l'objectif du système (évaluation et guidage d'un utilisateur) étaient le cahier des charges. La raison pour laquelle nous partons du modèle psychologique réside dans deux constats. Le premier est que le système est destiné à aider un utilisateur et non qu'un utilisateur doit initialement s'adapter au système informatique (le système doit alors adopter, ou ne pas gêner, le point de vue de l'utilisateur). Le second est très pratique : on ne peut justifier un travail *a posteriori* par un modèle théorique psychologique.

Le cahier des charges est donc le suivant :

- le logiciel doit proposer une évaluation et un guidage adaptés à l'utilisateur et non à un groupe d'utilisateurs prédéfinis ;
- le logiciel doit permettre la mise en œuvre du modèle d'acquisition des connaissances que nous avons décrit (acquisition de connaissances = un processus dynamique, qui s'étale dans le temps, qui évolue quantitativement et qualitativement)

Pour remplir ce cahier des charges, nous faisons un certain nombre de propositions que nous développons dans les chapitres suivants de cette partie du manuscrit. Celles-ci s'inscrivent au niveau de la représentation des connaissances, au niveau des processus d'évaluation et de guidage. Notre démarche est constante : nous présentons les difficultés auxquelles nous sommes confrontés, les solutions que nous proposons en termes de démarche théorique, les avantages et inconvénients de la mise en œuvre de ces principes et finalement leur réalisation concrète au travers d'un exemple pris dans GEREV. Suite à l'illustration applicative du principe, il arrive que nous proposons une description plus précise au niveau informatique (des morceaux de codes, une architecture logicielle, des choix de langage ...).

Chapitre 5

Une photo du réel dans lequel le réel n'est qu'imaginaire : la représentation des connaissances

5.1 Les connaissances manipulées

Comme nous l'avons souligné précédemment, le domaine de connaissances manipulé porte sur la parole. Une production vocale peut être quantifiée à l'aide de différents paramètres physiques tels que la fréquence fondamentale, l'intensité, la nasalisation des voyelles ...

Toutefois, une donnée quantitative d'un paramètre n'est pas suffisante pour déterminer la qualité et l'intelligibilité de la voix. Une parole intelligible résulte de la combinaison de plusieurs paramètres. Une déficience au niveau de l'un d'eux peut ne pas être gênante pour l'intelligibilité et ceci, grâce à la mise en place de phénomènes compensatoires qui masquent les variations de performance des différents paramètres.

Le spécialiste-orthophoniste utilise comme connaissance cible des affirmations de la forme "l'intensité doit être moyenne". Les productions différentes de la catégorie cible sont quant à elles catégorisées en "intensité trop faible", "fondamental instable" ... Il est assez hasardeux pour déterminer si une voix est intelligible d'avoir recours à un système de règles qui permettraient de déterminer un intervalle strict de valeurs correctes pour un paramètre donné connaissant l'état des autres paramètres.

Afin d'utiliser le même type et la même forme d'information que l'expert, une transformation initiale des données quantitatives en données qualitatives s'avère nécessaire. Cette catégorisation contraint néanmoins à quelques précautions :

- toutes les données quantitatives, quelles qu'elles, soient doivent être catégorisables ;
- le nombre de classes dans le système dépend du nombre de classes utilisées par le spécialiste ;
- la catégorisation doit être fiable et toujours donner lieu au même classement ;
- il faut conserver les proximités entre les données c'est-à-dire que deux intensités proches comme 50 et 51 dB doivent être catégorisées sinon dans la même classe, au moins dans deux catégories contiguës.

Néanmoins, dans la mesure où une parole intelligible ne peut être caractérisée par des données minimales nécessaires et suffisantes, la principale difficulté réside dans le fait que les données quantitatives dont nous disposons constituent des intervalles imprécis. Il ne nous semble pas pertinent de demander au sujet en cours de rééducation de produire une valeur d'un paramètre même si celle-ci est comprise dans

un intervalle. En effet, si l'on tient compte de tous les facteurs qui peuvent intervenir lors de la production vocale (le contexte syllabique par exemple) et des phénomènes compensatoires, la production d'un paramètre avec des valeurs incluses dans l'intervalle n'a que peu de sens en soi. La production vocale est un système complexe qu'il ne faut pas perdre de vue et qui doit être envisagée dans sa globalité (la globalité diffère de la somme des parties). Ainsi, il nous semble plus cohérent de parler de normes vers lesquelles les performances du sujet doivent tendre que de connaissances que le sujet doit acquérir. Une norme est définie comme l'ensemble des informations qui permettent de constituer la représentation cible d'un paramètre acoustique. Au niveau du système, les connaissances manipulées par l'expert, et par le système, sont des connaissances imprécises.

Si l'on revient maintenant aux systèmes existants que nous avons présentés au travers des deux premiers chapitres de ce manuscrit, force nous est de constater qu'aucun n'utilise les notions de normes ou de connaissances du domaine imprécises : même si les formalismes traduisant l'imprécision sont présents dans les tuteurs, ils ne concernent jamais les connaissances de référence de l'expert. Les formalismes représentationnels utilisés dans ces systèmes sont inadéquats, tout au moins sous leur forme actuelle.

5.2 La représentation tout en nuance d'une connaissance : la qualification floue

La première phase de notre travail est une transformation du quantitatif en qualitatif. A un niveau psychologique, ce mécanisme est à rapprocher d'un processus de catégorisation des données. Dans une optique rééducative, il est indispensable de disposer d'une représentation la plus fidèle possible de la production du sujet et non, par exemple, d'une probabilité qui élimine une quantité non négligeable d'information en ne donnant qu'une chance que la réponse du sujet soit dans une catégorie plutôt que dans une autre ; si la probabilité de la réponse du sujet catégorisée en "intensité moyenne" est de 0.8 (probabilité élevée), cette information n'exclut cependant pas que cette production soit à l'extérieur de cette classe sans que l'on puisse déterminer avec précision sa place réelle. Avec un tel système représentationnel, on risque alors de proposer des conseils et un guidage qui correspondent à un état cognitif, à un niveau de compétence différent de celui du sujet. Si cela est le cas, le guidage n'a pas de raison d'être puisqu'il ne répond pas aux besoins du sujet et ne permet pas de manière fiable d'accéder aux impératifs rééducatifs.

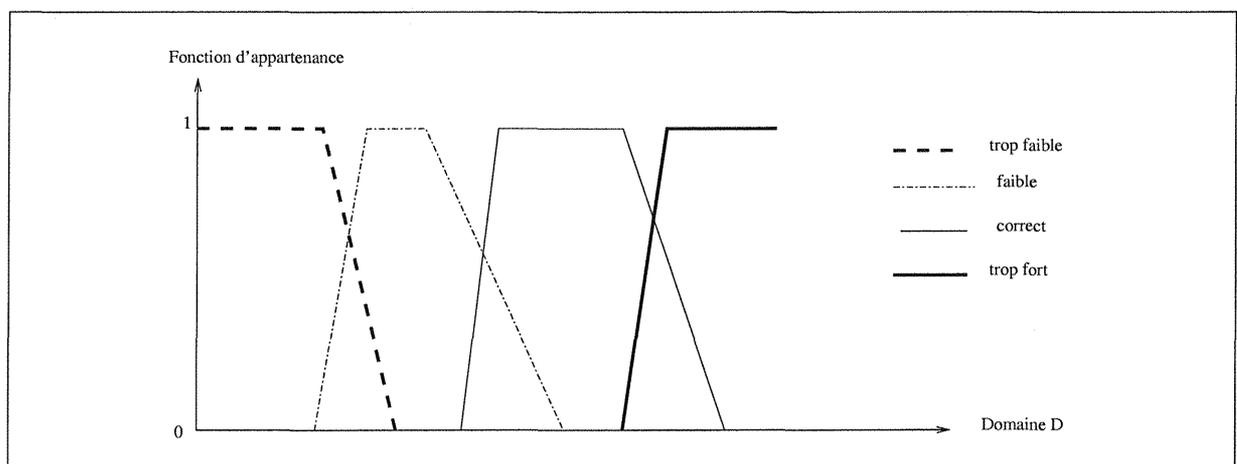


FIG. 5.1 – Un domaine D , ses ensembles flous E , et leur fonction d'appartenance

Le seul formalisme satisfaisant à la fois les contraintes de modélisation de connaissances imprécises

et celles permettant de transformer du quantitatif en qualitatif est celui ayant trait à la "catégorisation floue", si nous considérons bien entendu l'imprécision des connaissances et non celle relative à l'utilisation des appareils de mesure [Haton 91]. Une connaissance imprécise peut être modélisée fidèlement à l'aide de son degré d'appartenance aux différents ensembles flous définis sur le domaine auquel appartient cette connaissance. La figure 5.1 présente une collection d'ensembles flous sur un domaine D . Dans notre exemple, nous donnons la définition de quatre ensembles flous (trop faible, faible, correct, trop fort) permettant de qualifier par un facteur dans l'intervalle $[0, 1]$ l'appartenance d'une réalisation à chacun des ensembles. Un ensemble flou E se définit par la donnée d'une fonction μ d'appartenance des éléments du domaine à cet ensemble.

Pour des raisons de facilité de calcul et de mise en place, les graphes des fonctions d'appartenance sont définis sous forme de trapèzes pour lesquels il suffit de donner un quadruplet (a, α, β, b) , comme l'indique la figure 5.2. Les bornes α et β limitent le noyau de la fonction alors que a et b en limitent le support. Il est à noter que la plupart du temps dans GEREV, les ensembles flous extrêmes (trop faible ou trop fort dans l'exemple donné sur la figure 5.1) se représentent avec une plage supérieure infinie, dans les limites en réalité des variations possibles du paramètre concerné.

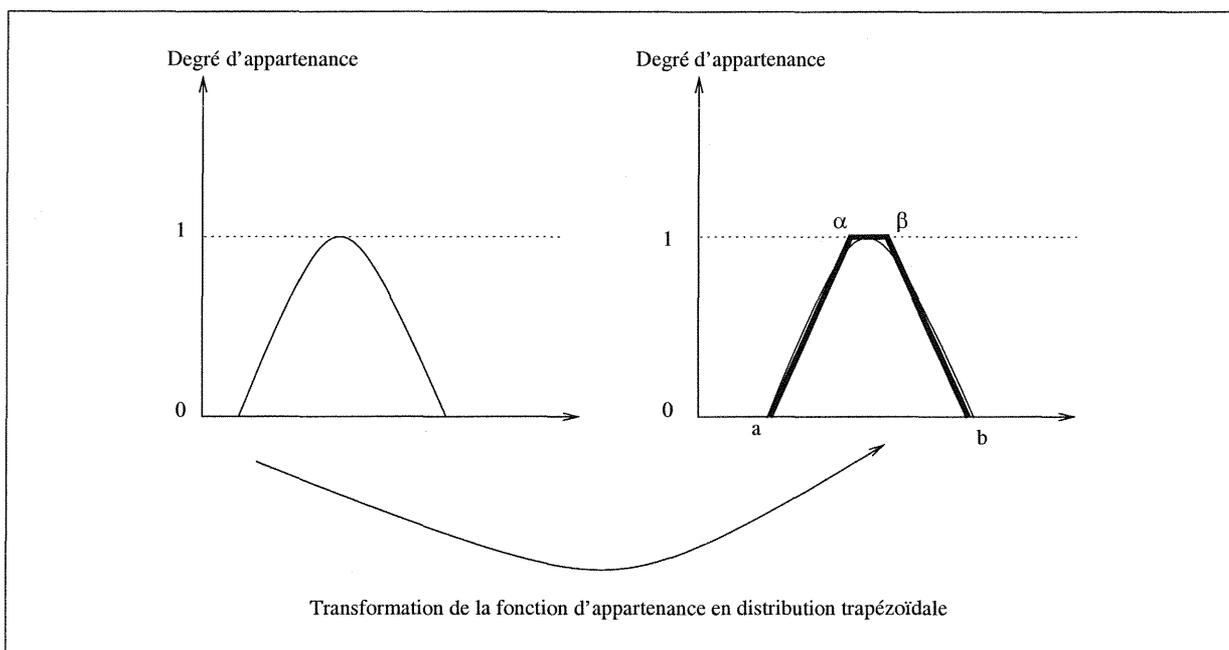


FIG. 5.2 – Passage d'une fonction à une distribution trapézoïdale

Nous parlons préférentiellement de catégorisation floue (et non de qualification)²⁵ ; cela implique que nous nous plaçons dans un cadre de représentation d'une connaissance, que nous envisageons l'aspect formalisme. Dans la suite de l'exposé, nous parlons des aspects liés au traitement mis en œuvre sur ces représentations (voir les chapitres 6 et 7).

5.2.1 Avantages

Proximité objet-reflet. Chaque connaissance manipulée, chaque paramètre, est définie sur un domaine D , sur lequel des ensembles E représentent les catégories manipulées par l'expert. Toutes les valeurs quantitatives potentielles sont représentées dans D . Toutes les productions du sujet, aussi pathologiques

²⁵ Le terme catégorisation est préféré ici par référence au traitement humain qui vise à ranger dans une même classe des objets ou des personnes de même nature.

ou inattendues possibles, possèdent une représentation. Et surtout, chaque représentation de la production d'un sujet reflète au mieux la production effective de l'élève au sens où le système ne choisit pas comme image la catégorie ayant le degré d'appartenance le plus élevé, mais propose plutôt de conserver toutes les informations, donc tous les degrés d'appartenance à la totalité des ensembles définis sur D . On maintient ainsi les notions de proximité entre deux productions successives... Une production p est ainsi modélisée par l'ensemble des μ_{E_i} . Ces données qualitatives sont conservées à l'intérieur de vecteurs. A une connaissance C , repérée par la valeur c d'un paramètre évoluant dans le domaine D , correspond un vecteur de valeurs de la forme :

$$C = \langle \mu_{E_1}(c), \dots, \mu_{E_i}(c), \dots, \mu_{E_n}(c) \rangle,$$

expression dans laquelle n désigne le nombre de catégories possibles pour la connaissance C .

Le fait d'utiliser une catégorisation floue des connaissances permet au système de disposer d'une image aussi précise que possible et sous différents angles de la production du sujet. Ainsi, la perte d'informations inhérente à la transformation du quantitatif en qualitatif est très limitée. On retrouve ainsi l'idée actuelle dans les tuteurs qui veut qu'on tente une prise en compte d'une réponse sous différents points de vue (différents experts, différents niveaux d'acquisition...)

L'humain a souvent recours au raisonnement qualitatif, ou à un raisonnement fondé sur des données incomplètes et imprécises, et ceci ne serait-ce qu'à un niveau perceptif comme celui que nous utilisons. Même si le spécialiste dispose de mesures quantitatives des différents paramètres vocaux, il met en œuvre par ailleurs une estimation qualitative de la voix de son patient. L'utilisation de la catégorisation floue permet de mettre en place un système de représentation facilitant ce type d'estimation et semble ainsi plus écologique, au sens de plus proche des processus de la cognition humaine.

Les niveaux d'expertise du sujet. Classiquement, la représentation et l'adaptation à différents niveaux de compétences sont rendue possible au travers de l'utilisation de la modélisation *a priori* de ceux-ci. Pour ce faire, les tuteurs ont recours à deux types d'approches ; soit les niveaux des sujets (débutant-expert) aiguillent le sujet sur un mode de fonctionnement du système prévu par le concepteur, soit la modélisation des connaissances de références s'appuie sur des modèles qualitatifs. Pour citer un système utilisant cette position, nous proposons l'exemple de QUEST [White 87] dans lequel les différents modèles envisagés correspondent aux niveaux d'expertise maîtrisés et à des reconceptualisations plus ou moins abstraites des connaissances manipulées.

Toutefois, quelle que soit l'approche envisagée, lorsqu'un tuteur est destiné à être utilisé par une population assez large, l'adaptation de l'interaction système-utilisateur est mise en place en fonction de l'appartenance au groupe de niveau du sujet et non en fonction du niveau du sujet lui-même. Nous proposons, quant à nous, d'amplifier l'adaptation à l'utilisateur en faisant reposer le guidage sur une représentation du niveau de l'utilisateur pour chaque connaissance plutôt que sur celui de son groupe de rattachement. En effet, les catégorisations des réponses des sujets constituent des évaluations du niveau du sujet mais ne sont pas utilisées pour sélectionner une réponse de la forme niveau expert ou novice. Chaque compétence ou réponse produite donne lieu à la détermination d'un niveau d'expertise du sujet pour cette dernière. Ainsi, le sujet n'est pas un expert ou un novice mais possède plutôt un canevas de niveau d'expertise. En combinant les possibilités des sujets, l'estimation qualitative de la réponse, le système a la possibilité de proposer une interactivité plus adéquate au sujet. La prise en compte du niveau du sujet, et ceci pour chaque facteur ou connaissance, est facilitée par le mode représentationnel continu que permet ici la catégorisation floue.

5.2.2 Inconvénient

L'inconvénient majeur de ce formalisme réside dans le caractère subjectif de la construction des fonctions d'appartenance. En effet, dans la mesure où elle est laissée à l'appréciation de la personne qui les définit, les fonctions peuvent varier de manière notable. Toutefois, dans notre système, vu les spécificités des connaissances manipulées et leur aspect non formel, cet inconvénient est quelque peu atténué. En effet, cette subjectivité apparaît également chez le spécialiste et n'entrave en aucune manière la rééducation.

5.2.3 Bilan de l'utilisation du flou

L'application du flou au problème de la représentation est assez intéressante dans une optique de modélisation qualitative précise. On obtient ainsi une image sous différents angles d'une réponse de l'utilisateur, ce qui revêt une importance toute particulière dans le cadre rééducatif. Nous sommes cependant conscient qu'il est illusoire de penser que notre type de représentation nous fournit une image exacte et fidèle de la production de l'apprenant, dans la mesure où les fonctions d'appartenance relèvent d'une certaine subjectivité. Celle-ci est toutefois préférable à une estimation issue de critères de classification forcément subjectifs. Outre ces aspects, ce formalisme permet de modéliser qualitativement des connaissances qui pourront ensuite donner lieu à un traitement précis proche de celui fréquemment mis en œuvre chez l'humain sur des données identiques et ainsi permettre une adaptation réelle avec l'utilisateur.

5.3 Une représentation unifiée : les schémas

Dans un système interactif, les connaissances manipulées, excepté celles portant sur la pédagogie utilisée, portent sur les connaissances expertes ou cibles et sur les connaissances de l'élève. Comme nous l'avons déjà signalé, ces deux domaines de connaissances peuvent utiliser des formalismes variés et ceci, au sein d'un même système. En effet, ces domaines répondent à des impératifs différents ; l'un a pour objectif de modéliser les connaissances du domaine, c'est-à-dire les réponses correctes mais également les erreurs pouvant être commises alors que l'autre doit modéliser au mieux les connaissances, ou leur absence, de l'élève tout en tenant compte de certains facteurs tels que l'incertitude des mesures ou de l'interprétation que le système fait à partir du comportement observé.

Malgré ces divergences, ces deux domaines, classiquement appelés modules ou modèles, doivent présenter des compatibilités. Nous proposons pour améliorer cette compatibilité et limiter le coût d'implantation de ces deux modules d'unifier les formalismes représentationnels.

Lorsque le système se place dans une perspective de représentation de l'état cognitif de l'apprenant de type *overlay* ou *recouvrement*, ce qui est le cas de notre travail, un mode de représentation unique pour la connaissance experte et celle de l'élève est le plus adéquat [Nicaud 88]. Dans cette optique, les connaissances de l'élève constituent un sous-ensemble de celles de l'expert. Comment concevoir qu'une partie d'un ensemble ait une forme différente de celle de l'ensemble ou que la forme des parties diffère de celle du tout ?

Nous proposons d'utiliser des schémas. Un schéma se définit comme une structure de données prototypique (une classe au niveau de la conception objet en informatique), servant à définir une classe d'objets. Un objet est ainsi un exemplaire du prototype considéré. À l'intérieur d'une classe, d'autres classes plus spécifiques peuvent être définies. Ainsi, une connaissance est représentée par un schéma qui peut contenir d'autres schémas plus spécifiques comme par exemple des schémas relatifs aux contextes d'utilisation. Les objets sont alors les réalisations ou les représentations de la performance du sujet à un moment donné, dans le cadre du module de l'élève, et les catégories de référence dans celui du module de

l'expert. Les schémas constituent les unités organisationnelles de notre système ; elles vont se retrouver au niveau du module de l'expert ainsi qu'à celui de la modélisation des connaissances de l'élève.

5.3.1 Le module de l'expert

Chaque unité de connaissance, chaque paramètre, contient des éléments de base qui sont : sa dénomination, l'unité de mesure, la connaissance cible, la distribution des fonctions d'appartenance dans le domaine considéré, les conseils associés aux fonctions d'appartenance. L'ensemble de ces éléments constitue le schéma minimal d'une unité de connaissance. Nous proposons sur la figure 5.3 une illustration de cette représentation prototypique.

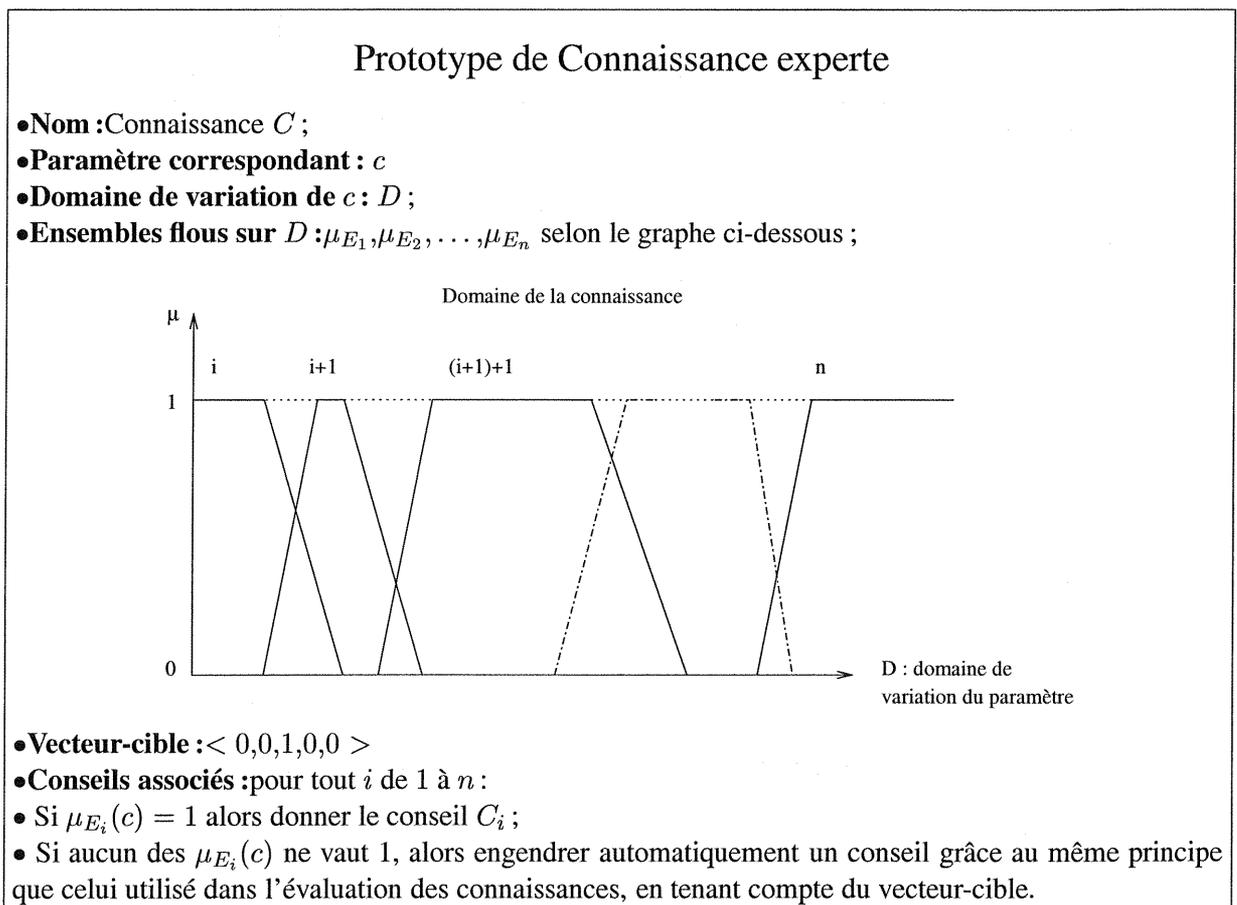


FIG. 5.3 – Prototype de connaissance du module de l'expert

Une fois particularisé, toutes les connaissances définies sur D ont ainsi le même aspect, la même structure.

Si l'on trouve les conseils directement dans ce module, attachés aux catégories de la connaissance, cela s'explique par le fait qu'à un défaut particulier correspond une remédiation et donc un conseil. Le principe de ce choix de mode de fonctionnement repose sur l'idée qu'il faut adapter prioritairement la situation dans laquelle les conseils sont proposés au sujet et/ou l'aide fournie (la manière de présenter les choses : la visualisation ...) plutôt que les conseils eux-mêmes.

Ce module va ainsi nous permettre de proposer des estimations des productions vocales des sujets et

des conseils en fonction de ces dernières. Ce que nous voulons modéliser ici, ce sont des quantifications et qualifications de comportements et non des interprétations de ceux-ci. Ce ne sont donc pas à proprement parler des connaissances mais plutôt les manifestations de celles-ci. Ce dernier point justifie l'utilisation ultérieure de la notion "d'aptitude" ou de compétence et non de connaissance. Nous définissons l'aptitude en terme de manifestation comportementale sans référence aux connaissances sous-jacentes. Nous sommes ainsi dans le cadre d'un système tuteur qui propose une analyse et une modélisation comportementale du sujet.

Les principaux intérêts du recours aux schémas résident dans la structuration des connaissances²⁶, dans leur instanciation ultérieure et surtout dans l'uniformisation des représentations de connaissances dans les modules expert et élève.

5.3.2 Le module de l'élève

Le module de l'élève va être, au niveau de la modélisation des connaissances, une instance des schémas du module de l'expert. Nous illustrons ce point dans la figure 5.4. En effet, la fonction essentielle de ce module est de modéliser les connaissances du sujet par rapport à celles de l'expert afin que le système puisse le guider jusqu'à la connaissance cible.

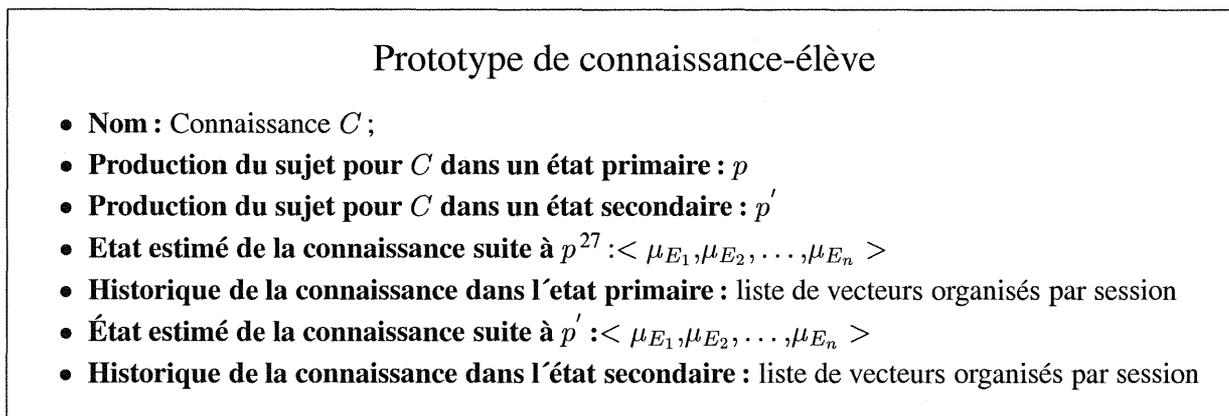


FIG. 5.4 – Prototype de connaissance-élève

Comme nous pouvons le voir sur la figure 5.4, deux niveaux d'aptitude sont représentés : celui concernant l'aptitude en contexte (l'état du facteur primaire) et celui hors contexte (l'état du facteur secondaire). Ces deux derniers points sont développés dans le chapitre 5.

Quant à l'aspect incertain/imprécis de la modélisation des connaissances ou de l'intention sous-jacente du comportement observé, il n'a pas lieu d'être dans le formalisme choisi ici. L'imprécision, due éventuellement à la catégorisation des données n'existe pas dans la mesure où le système ne choisit pas une catégorie plutôt qu'une autre mais prend l'image de la production réelle. Ce qu'il y a de subjectif et donc d'imprécis, c'est le positionnement des fonctions d'appartenance sur le domaine de connaissance.

L'incertain dans l'interprétation des comportements, pour la même raison que précédemment, est également éliminé. L'intention également n'intervient pas ici. En fait, le système positionne une production, une performance, par rapport à une connaissance experte qui regroupe toutes les réalisations possibles. Ce positionnement est d'autant plus aisé que les formalismes utilisés entre les modules expert-élève sont identiques.

26. Nous utilisons la dénomination de "connaissance" dans le cadre des références théoriques telles que les aspects de modélisation et de représentation de connaissances ... et "aptitude" en référence aux notions ayant davantage trait à l'utilisation qui en est faite.

Le profil de l'élève est, grâce à la représentation unifiée, une instanciation d'une particularisation du schéma expert ou plutôt du domaine de référence.

5.3.3 Quelle validité pour cette unification ?

Outre les avantages pour le système représentationnel, que ce soit au niveau de la simplicité d'implantation ou celui de la couverture représentationnelle, le problème que l'on se pose ici est de savoir si cette unification présente une certaine validité ou si elle ne correspond qu'à une vision informatique du système. Lorsque l'on raisonne en termes d'évolution de connaissances, on pense souvent à Piaget [Piaget 74] et aux notions de *schèmes ou schémas*²⁸ qui organiseraient la connaissance du sujet. Un schéma est constitué de constantes, de variables qui sont les unes et les autres fixées, et de valeurs possibles de ces variables, le cas échéant accompagnées d'une représentation de leurs distributions. La mémoire à long terme est supposée contenir des représentations génériques des objets, des événements ..., sous forme de schémas. Par conséquent, la connaissance chez un individu varie au niveau du contenu [Bloch 94] mais pas à celui du mode de représentation (le schéma). Il y aurait ainsi pour un domaine particulier des schémas plus ou moins complexes de niveaux plus ou moins abstraits. La connaissance experte ou la plus complète possible est formalisée sous forme de schémas. Si l'on veut maintenant représenter la connaissance particulière d'un sujet, à un moment donné, le mode le plus adapté ou significatif est le schéma ou plutôt un sous-schéma du schéma le plus général que l'on pourrait trouver pour cette connaissance.

Ce type d'approche est en adéquation avec les propositions d'unification de la représentation proposée. On peut ainsi espérer, tout au moins à ce niveau, que notre travail présente quelque intérêt et une certaine validité d'un point de vue cognitif.

5.4 Application dans GEREV

Dans GEREV, une aptitude manipulée correspond à un paramètre²⁹ physique issu du traitement de la parole réalisé dans SIRENE. Chaque exercice rééducatif a pour objectif de travailler spécifiquement un paramètre particulier. Celui-ci prend alors la fonction de paramètre primaire (C_i) ou paramètre en contexte. Tous les paramètres vocaux sont représentés de la même manière, grâce à des schémas. Néanmoins, deux types de paramètres sont à distinguer :

- les paramètres transformés tels que la stabilité du fondamental ;
- les paramètres non transformés tels que l'intensité.

Les paramètres transformés. Dans ce cas, la distribution des fonctions d'appartenance ne se fait pas directement sur une mesure de C_i . Elle a lieu sur un rapport ou un calcul à partir d'un paramètre. Par exemple, pour calculer la stabilité du fondamental, on a recours à un calcul de *jitter* qui consiste à fournir un indice de stabilité. Si l'indice est inférieur à un certain seuil, on estime que les variations de

28. Définitions issues de [Bloch 94] : Les schèmes sont des structures qui rassemblent des cycles d'action, ou des objets, des événements qui diffèrent entre eux mais sont considérés équivalents par un individu donné. Au niveau des propositions de Piaget, un schème est une totalité organisée qui se construit par tâtonnement et par assimilation d'éléments nouveaux à un schème antérieur, et qui se conserve en fonctionnant par simple répétition suivie de généralisation.

Le schéma est, quant à lui, un ensemble structuré de connaissances abstraites qui représente un domaine particulier d'objet-stimulus, avec ses traits caractéristiques, ou attributs, et les relations entre les attributs.

29. Nous distinguons, dans la suite de cet exposé, les termes "aptitude" et "paramètre" selon leur seul degré d'opérationnalisation au sens psychologique. Le paramètre correspond en fait à l'aptitude que l'on aurait opérationnalisée ; au niveau informatique, on parlerait davantage d'instanciation.

fondamental sont normales ; au delà de celui-ci, la voix est considérée comme pathologiquement instable. La représentation de ce paramètre est présentée sur la figure 5.5

- **Nom** : Stabilité du fondamental
- **Paramètre correspondant** : c
- **Domaine de variation de c** : D ;
- **Ensembles flous sur D** : $\mu_{E_1}, \mu_{E_2}, \mu_{E_3}$ selon le graphe ci-dessous ;
- **Vecteur-cible** : $\langle 0, 0, 1 \rangle$
- **Conseils associés** :
 - pour $\mu_1(c) = 1$ donner le conseil x
 - pour $\mu_2(c) = 1$ donner le conseil y
 - pour $\mu_3(c) = 1$ donner le conseil z
- Si aucun des $\mu_{E_i}(c)$ ne vaut 1, alors engendrer automatiquement un conseil grâce au même principe que celui utilisé dans l'évaluation des connaissances, en tenant compte du vecteur-cible.

FIG. 5.5 – Schéma de l'aptitude "stabilité du fondamental"

Les paramètres non transformés. Pour ces paramètres, la description et le principe sont ceux décrits de manière générale : on modélise directement le domaine au travers de diverses fonctions sans transformer les données comme cela est décrit dans le paragraphe ci-dessus.

Modélisation d'une production dans le profil de l'utilisateur. La modélisation du comportement est relativement simple : elle consiste à attribuer à la production du sujet pour un paramètre donné les valeurs c obtenues à partir du graphe proposé dans le module de l'expert, une représentation sous la forme d'un vecteur, c'est-à-dire de lire les degrés d'appartenance aux différents ensembles flous. Ce vecteur est l'image de la production du sujet pour le paramètre qu'il modélise à un instant donné. Lors d'une réalisation vocale, plusieurs paramètres interviennent. C'est au travers de la combinaison des différents paramètres que se fonde la qualité de la production. Même si dans une progression pédagogique rééducative, on propose de se focaliser sur un paramètre à la fois, une prise en compte plus globale de la réponse du sujet est intéressante d'un point de vue contrôle des acquisitions (modifications comportementales à long terme) mais également d'un point de vue technique pour des raisons d'absence d'indépendance entre les paramètres que nous avons déjà évoquées. Par conséquent, outre les paramètres primaires, il est indispensable de modéliser des connaissances autres, les paramètres secondaires notés P' . Cette fois encore, le principe de modélisation est simple puisqu'il est identique à celui décrit pour les paramètres primaires.

5.5 Bilan

Nos propositions se situent, au niveau théorique, dans la suite de l'approche par *recouvrement ou overlay* [Nicaud 88, Vanlehn 88] et s'appliquent au domaine des tuteurs comportementaux. Nous proposons une illustration de ces deux points sur la figure 5.6. Les connaissances de l'expert regroupent à la

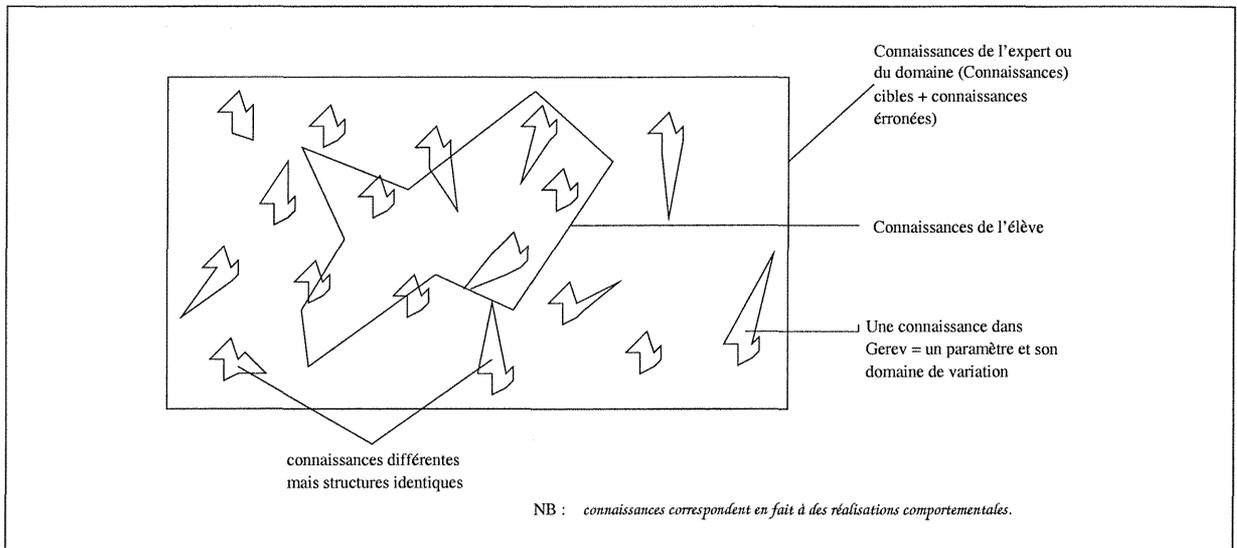


FIG. 5.6 – Modélisation des connaissances dans notre système

fois des connaissances correctes et erronées. Elles constituent l'intégralité des connaissances dont le système dispose sur le domaine. Une connaissance, dans GEREV, est une structure de données portant sur un paramètre. Elle se compose de la connaissance à atteindre, des connaissances erronées, des conseils attachés à chaque sous ensemble de la connaissance (un sous-ensemble est représenté à l'aide d'un ensemble flou). Les connaissances de l'élève sont constituées par un sous ensemble des connaissances expertes, des connaissances du domaine. Ces dernières peuvent être plus ou moins maîtrisées. Lorsque l'élève présente une intensité trop forte par exemple, seul le sous-ensemble concernant cet aspect de l'intensité est modélisé dans le profil de l'élève. Alors que, lorsque l'élève présente une intensité correcte, on estime qu'il en est capable parce qu'il sait ce qui est fort ou faible. Par conséquent, la connaissance "intensité" du profil et de l'expert sont identiques.

La particularités de notre travail relève de la couverture totale du domaine de connaissances, et ceci sans adjonction réelle d'une bibliothèque d'erreurs et de l'unification du système de représentation des modules expert et élève. Chaque connaissance modélisée n'est pas définie en tant que connaissance correcte et connaissances erronées mais plutôt comme un domaine à part entière. Ainsi, une connaissance cible est déterminée ; autour de cette connaissance, des approximations sont proposées. Les aptitudes que nous manipulons ne font pas appel à la notion d'erreur mais plutôt à celle d'approximation qui sont des réalisations plus ou moins proches de la production cible recherchée (nous développons la notion de distance entre la connaissance cible et la réalisation du sujet dans la section 6.1).

Contenu des modules. Le module de l'expert se compose de l'ensemble des connaissances du domaine à enseigner, représenté au travers de schémas. Chaque schéma correspond à une aptitude qui est elle-même totalement couverte grâce à l'utilisation d'une distribution d'ensembles flous dont les ensembles extrêmes ne sont pas limités ou finis. A chacun de ces ensembles flous correspond un ou des conseils de réalisation vocale.

Le module de l'élève, sous-ensemble du module de l'expert, se compose des images fidèles des réponses de l'élève. Ces images sont en fait des vecteurs qui modélisent les appartenances aux différents ensembles flous de la connaissance modélisée dans le module de l'expert. Ce modèle est composé des objets, directement issus des schémas du module expert. On parle bien ici d'images au sens où le système

ne va pas catégoriser une production de manière exclusive, mais plutôt en prendre une sorte de "négatif" qu'il va utiliser par la suite en l'état. Une transformation du négatif en instance d'une classe "bien", "trop fort" n'est pas nécessaire au système pour guider et adapter l'interaction à l'utilisateur.

Fonctions. Le module de l'expert a pour fonction essentielle de fournir une description aussi fiable que possible du domaine de connaissances. Dans notre cas, cette fonction est totalement remplie puisque nous estimons que le mode de représentation proposé pour le module expert couvre l'intégralité du système. Il ne propose aucunement de démonstration, de simulation du comportement expert ou de résolution de problèmes.

Le module de l'élève doit permettre l'établissement d'une interaction [Self 87] et ceci en modélisant les connaissances justes ou erronées de l'élève, en permettant de guider les prochaines actions à entreprendre, en facilitant le diagnostic du comportement réel, en permettant de sélectionner le mode pédagogique le plus adapté, ... Le formalisme que nous avons choisi va permettre de réaliser au moins trois des quatre fonctions proposées par VanLehn [VanLehn 87] :

- augmenter la connaissance de l'élève ;
- offrir des conseils non sollicités ;
- individualiser les explications en les adaptant au niveau de la connaissance de l'élève.

Nous estimons que la conception du module de l'élève que nous proposons lui permet de remplir son objectif.

Adéquation entre les connaissances à acquérir et les connaissances acquises. Notre système est à rapprocher des systèmes de type *Issue-based Model*³⁰. Ceux-ci comparent en fait l'entrée de l'élève, sa réponse, à celle attendue (la connaissance cible du module de l'expert) et à celle produite jusqu'à présent, c'est-à-dire modélisée dans le profil de l'élève. Le fonctionnement du système est déterminé par la détection de décalages entre les connaissances cibles et celles modélisées dans le profil de l'élève. Si l'état de connaissances de l'élève pour une connaissance donnée ne concorde pas avec celle de l'expert, l'utilisateur reçoit immédiatement une rétroaction qui peut prendre des allures assez variées ; le dialogue peut être superficiel et ne proposer que l'action correcte à mettre en œuvre ou relativement complexe en proposant le raisonnement détaillé sous-jacent à la règle comportementale. Dans ce type d'approche le module expert et le module de l'élève doivent présenter une compatibilité importante.

D'autres approches existent telles que celles de type *Black Box Model*³¹ [Anderson 90] et *Cognitive Model*³².

Notre approche présente également des intersections avec les modèles cognitifs ; dans la mesure où nous prévoyons une évolution des connaissances en terme qualitatif au travers de schémas, nous nous rapprochons de cette conception. Les notions d'évolution de connaissances ou de stade, au sens

30. Nous proposons à l'instar de Danna [Danna 97] comme traduction : un Modèle reposant sur les points d'achoppements.

31. Ce modèle repose sur l'établissement d'un choix d'une base de connaissances référencées. Le contenu du domaine est naturellement organisé à l'intérieur d'une symbolique existant que le système comprend. Le critère d'acceptation d'une performance est clairement identifié. Si le comportement du sujet n'entre pas en adéquation avec la solution retenue, la réponse est considérée comme erronée et le système peut proposer des solutions possibles. L'interaction système-utilisateur est très sommaire. Le tuteur ne fournit pas d'explications détaillées du raisonnement de l'utilisateur.

32. Nous le traduisons par "Modèle cognitif". Ces modèles veulent modéliser de manière réaliste le processus de résolution de problèmes humains. Les trois types de connaissances sont procédurales, déclaratives et qualitatives.

Les connaissances procédurales se rapportent à la manière dont la tâche est réalisée. Les connaissances déclaratives sont des ensembles de faits organisés pour permettre le raisonnement. Les connaissances qualitatives impliquent la compréhension causale qui permet aux humains de raisonner sur des comportements utilisant les modèles du système. Les modèles experts utilisant les connaissances qualitatives modélisent différents stades de développement.

développemental, sont également des notions essentielles dans notre travail. Toutefois, nous ne proposons pas comme dans ce type de systèmes de découper les connaissances en procédures, en faits et en niveaux qualitatifs.

Notre objectif est de proposer une représentation la plus fiable et compatible possible entre les différents modules l'utilisant tout en ménageant, certes, une certaine validité cognitive au niveau de la manipulation et du traitement des connaissances.

Notre objectif n'est en fait non de simuler un ou une partie du fonctionnement humain lors d'une tâche de résolution de problèmes mais plutôt de s'inspirer de travaux des sciences cognitives pour proposer un système de représentation, de traitement et de guidage d'un utilisateur en phase d'acquisition de connaissances le plus efficace et adapté possible à son objectif initial : l'adaptation du système informatique à son utilisateur.

Chapitre 6

Diagnostic, Synthèse : un défi!

Dans le chapitre précédent, nous avons traité du problème du formalisme et de l'organisation des connaissances.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux mécanismes qui constituent le coeur du système de traitement des réponses de l'utilisateur et permettent ainsi la mise à jour des connaissances dont le système dispose.

Le profil utilisateur est, dans un tuteur tel que nous l'avons précédemment décrit (page 109), en perpétuelle évolution. Son efficacité est relative à la fois à son adéquation avec les autres modules (section 5.3) et à sa pertinence vis-à-vis de l'utilisateur. Par conséquent, il est indispensable que l'évolution du profil soit parallèle à celle du sujet et qu'une modification de l'état de connaissances du sujet se répercute très rapidement au niveau de sa modélisation informatique.

Dans un système comme le notre, la mise à jour du profil doit se faire *on-line* (section 2.2.1), c'est-à-dire en temps réel afin d'adapter au plus vite les rétroactions à fournir aux possibilités de l'utilisateur. Pour ce faire, nous envisageons successivement les mécanismes d'évaluation des réponses du sujet et de synthèse de ces dernières. Les premiers amènent le système à qualifier la réponse du sujet et les seconds, à incorporer cette donnée aux connaissances antérieures dont dispose le système sur l'utilisateur.

6.1 Évaluation initiale

Nous envisageons dans notre travail des évaluations des performances de l'élève à plusieurs niveaux. La première a pour fonction de fournir à l'utilisateur une rétroaction sur ses deux dernières productions. Cela consiste en fait à lui dire si sa dernière production est de meilleure ou de moins bonne qualité que celle précédemment fournie. A notre connaissance, ce type d'évaluation n'est pas réalisée automatiquement par les systèmes sous cet aspect ; en effet, même si l'on compare le diagnostic fourni pour une réponse à un instant donné à celui fourni pour la réponse précédente, cela est effectué afin d'estimer au niveau du mécanisme de synthèse des données si les deux réponses sont congruentes, c'est-à-dire si elles vont bien dans le sens du même diagnostic. Dans le cas contraire, une évolution de la connaissance ou une connaissance bruitée est suspectée. Dans ces systèmes, l'optique de cette comparaison entre les réponses du sujet pour un même type de connaissances est de fournir une technique de contrôle ou de diagnostic au système alors que dans notre approche, cette comparaison a pour objet d'offrir au sujet une rétroaction qualitative de sa réponse. Cette rétroaction permet ainsi de conforter éventuellement le comportement venant d'être produit et donc, les connaissances sous-jacentes.

6.1.1 Une évaluation initiale : oui, mais quel intérêt ?

En réalité, le premier point à régler concerne l'utilité réelle du recours explicite à cette évaluation supplémentaire et de la rétroaction proposée. Afin d'apporter une justification à notre proposition, nous articulons ce paragraphe autour de trois notions qui sont l'apport d'informations permettant la consolidation de la connaissance, l'effet motivationnel sur la tâche, la validité cognitive d'une telle évaluation.

La consolidation de la connaissance.

Comme nous l'avons vu dans la première partie, l'acquisition de la connaissance est intimement liée à l'estimation de sa pertinence ou de son utilité dans une situation donnée. La pertinence ou l'utilité d'une réponse³³ est ainsi directement dépendante et définie par l'amélioration de performance permise par son utilisation. Pour apprécier la performance ou son évolution, le sujet dispose de différents indices qui sont environnementaux ou comportementaux. Dans les tuteurs, le plus souvent, l'indice de performance dont dispose l'utilisateur consiste en un retour pour les solutions proposées à un problème. Dans certains systèmes, plusieurs solutions différentes mais correctes peuvent être fournies.

La rétroaction peut revêtir plusieurs formes :

- le système accepte la solution proposée par l'utilisateur, sous réserve que celle-ci soit correcte, et propose une rétroaction en fonction du plan suivi comme c'est le cas dans MENTONIEZH ; ce logiciel n'indique pas la solution optimale au problème posé en fonction des critères initiaux, et ne procure aucune évaluation qualitative des réponses successives du sujet de la forme "la solution précédente est plus adéquate que celle mise en œuvre dans ce problème pourtant identique". Par conséquent, malgré la pertinence de cette information, ce type de jugement est laissé à la charge du sujet de manière implicite ;
- le système accepte une et une seule solution : celle de l'expert. Il rejette toutes les autres propositions sous-optimales même si ces dernières sont correctes.

Notre approche consiste à rendre explicite la pertinence et la qualité d'une solution proposée en fournissant une évaluation et surtout une rétroaction directe. Celle-ci s'applique à toutes les réponses de l'utilisateur pour une aptitude que la réponse corresponde à celle recherchée ou qu'elle soit un peu "décalée". Cette évaluation est néanmoins soumise à une contrainte de temps non négligeable : l'évaluation doit être proche de l'émission de la réponse. Faire référence à une réponse éloignée n'aurait aucun sens puisque le sujet doit être en mesure de se souvenir facilement de l'objet de l'évaluation. A quoi servirait de comparer une production au temps t à une autre au temps $t - n$ avec $n > 1$? En effet, si le sujet ne situe plus précisément les mécanismes qui l'ont conduit à la réponse produite au temps $t - n$, la comparaison avec toute autre réponse est totalement inutile. Bon nombre d'auteurs ont d'ailleurs bien insisté sur l'importance de la proximité entre réponse et rétroaction [Le Ny 75]. Par conséquent, cette évaluation que nous appelons initiale³⁴ ne s'applique qu'à l'intérieur d'une session (page 134) et sur les deux dernières productions ayant trait à une même aptitude.

L'effet motivationnel sur la tâche

Chaque tâche n'est pas une tâche parmi d'autres. Le recours à une évaluation entre deux réponses de même type induit une certaine dépendance entre les tâches et conduit, c'est en fait le but recherché, à une

33. La notion de réponse est prise au sens large ; elle correspond en fait à toutes les manifestations cognitives et comportementales produites par un stimulus, une situation.

34. Nous parlons ici d'évaluation initiale au sens où elle correspond à une comparaison de niveau relativement bas : comparer deux productions entre elles.

certaine compétitivité intrasujet. Proposer une rétroaction au sujet qui, en plus de lui dire si la réponse est correcte ou non, lui fournir une comparaison des deux dernières productions le conduit à essayer de faire toujours mieux.

De plus, certains travaux [Abou-Jaoude 99] ont montré que l'effet motivationnel au sens large³⁵ ou émotionnel a un impact d'autant plus important que le niveau de connaissances de l'utilisateur est faible. Cela se traduit par le fait qu'un sujet présentant des lacunes importantes dans un domaine de connaissances (un novice) sera davantage sensible aux encouragements (renforcements positifs) et aux réprobations (renforcements négatifs) sur ce domaine particulier qu'un expert. La sensibilité, ici, coïncide au degré de l'effet des renforcements ; ce point se manifeste par une maximisation des effets des renforcements (qu'ils soient positifs ou négatifs) lorsque la sensibilité est grande. Cet effet motivationnel, même si l'on peut considérer qu'il présente moins d'intérêt que l'effet précédent, ne manque pas d'attrait. Ce que l'on recherche avec un système d'apprentissage ou de rééducation, c'est une amélioration de la performance du sujet en la rapprochant le plus possible de la production théorique cible. Plus le niveau de l'utilisateur est bas, c'est-à-dire loin de la cible, plus il va bénéficier de ces rétroactions qui vont maximiser (augmentation de l'effet du renforcement positif) la chance de produire une réponse meilleure que celle proposée précédemment et minimiser celle de produire une moins bonne réponse (en maximisant également la rétroaction négative, ce qui induit la recherche d'une autre solution).

La validité cognitive

Le dernier intérêt de la mise en place de ce type d'évaluation se situe à un niveau moins théorique que les deux précédents. En effet, l'évaluation de nos comportements, des réponses fournies dans une situation naturelle, se fait généralement par comparaison entre les différentes réponses fournies par le sujet lui-même face au même problème dans des situations identiques. La question que se pose le sujet est alors la suivante : "Est-ce que ce comportement particulier entraîne des conséquences plus positives, est plus efficace que cet autre comportement?". Il est tout de même assez rare dans des conditions normales d'apprentissage (que l'on distingue des conditions d'acquisition de connaissances scolaires) de disposer d'une connaissance de référence absolue qui permette de connaître le comportement optimal dans chaque situation. Pourquoi, dans ces conditions, ne pas avoir recours à ce type d'évaluation familière dans un tuteur ou tout au moins, utiliser une référence propre au sujet³⁶ ?

6.1.2 Une évaluation initiale : mise en œuvre et difficultés

Nous venons de présenter les intérêts théoriques et empiriques majeurs de l'évaluation initiale. Il reste maintenant à l'appliquer dans un système tel que GEREV. Les difficultés qu'il faut résoudre dans la mise en place d'un tel mécanisme relèvent de deux axes essentiels qui sont :

- qu'est-ce que deux réponses qualitativement différentes ?
- comment définir une notion d'ordre sur deux réponses qualitativement différentes ?

Une différence qualitative.

Lorsque l'on compare deux réponses ou même une réponse du sujet et la réponse cible de référence, il faut d'abord définir ce que l'on appelle la réussite et l'échec ou la distance minimale entre deux réponses pour qu'il existe une différence significative (qualitative) entre ces réponses, sans oublier bien

35. Motivation au sens proposé dans la première partie de ce manuscrit.

36. Dans la suite du manuscrit, on parlera essentiellement de l'internalisation de la connaissance de référence. Celle-ci correspond en fait à une utilisation, à un moment donné, d'une connaissance particulière du sujet comme étalon de mesure de l'efficacité d'une autre réponse produite par le sujet.

entendu qu'une réponse n'a de valeur qu'en fonction de la question posée. Effectivement, même à l'intérieur de domaines très formalisés comme l'arithmétique, des réponses de formes différentes peuvent être sémantiquement équivalentes comme l'illustre la figure 6.1. Sur cette figure, les expressions sont qualitativement équivalentes si le problème posé à l'élève est d'écrire des équations ayant les mêmes solutions mais de forme différentes. Elles ont subi des transformations de type factorisation ou additivité.

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. $2x^2 - 3(2x - 9) = 0$ 2. $x(2x - 6) + 9 = 0$ 3. $(2x^2 - 6x) = (-9)$ 4. $2x(x - 3) = -9$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

FIG. 6.1 – Expressions syntaxiquement différentes mais sémantiquement équivalentes ?

Si maintenant, la tâche du sujet est de factoriser l'expression $2x^2 - 6x + 9 = 0$, la solution à adopter n'est pas forcément aussi évidente ; plusieurs expressions sont des équations résultantes de l'application de règles de factorisation mais toutes ne le sont pas avec le même degré. Chaque expression est syntaxiquement différente des autres mais respecte la consigne de factorisation. La question que l'on se pose alors est : qualitativement parlant, présentent-elles toutes le même degré de réussite ou de satisfaction ? Lorsque l'on compare $x(2x - 6) + 9 = 0$ à $2x(x - 3) = -9$, considère t'on que les deux sont équivalentes puisque le principe est mis en œuvre ou que la première est différente de la seconde, voire même moins bonne parce que moins factorisée ? La résolution de cette question repose sur une qualification et une détermination des solutions en fonction de l'objectif suivi.

Il n'est pas aisé de résoudre le problème de définition de la réussite ou de l'échec. En fait, classiquement, les concepteurs des différents systèmes établissent la ou les bonnes réponses possibles. Celles-ci peuvent être des plans d'actions, des résultats numériques, ... Ensuite, ils déterminent si la réponse du sujet correspond à une des solutions proposées par le système. Cette détermination est précise, c'est-à-dire qu'elle est uniquement booléenne : soit la réponse est correcte, soit elle est incorrecte, même si comme dans les "buggy systems" la réponse incorrecte est ensuite traduite en une application non adaptée d'une règle correcte. L'évaluation proposée par ces systèmes est ainsi qualitative à deux états. Nous proposons de nuancer en diversifiant cette évaluation.

Une réponse du sujet peut être correcte, c'est-à-dire correspondre exactement à la réponse attendue, incorrecte, mais également se situer entre ces deux états. L'idée que nous défendons est celle de la nécessaire prise en compte de la distance qualitative entre la cible et la réponse. Concrètement, nous proposons d'automatiser et d'informatiser le concept du "c'est presque ça". La mise en œuvre de cette notion contraint à la fois à multiplier les états potentiels entre la connaissance correcte et la connaissance erronée et à définir ce qu'est une connaissance "presque correcte" par exemple. Ces deux propositions sont complémentaires puisque ajouter des états intermédiaires oblige à établir les limites de ceux-ci et donc à les déterminer précisément.

Dans cette optique, deux situations ou plutôt deux types de connaissances sont tout d'abord à différencier :

- des données discontinues et non ordonnées ;
- des données continues.

Dans la première situation, l'introduction d'un ou de plusieurs états peut être assez coûteux. En effet, lorsque l'on dispose de données discontinues telles que des concepts (mathématiques, logiques, ...) ou des règles (raisonnement, ...), la première étape est de construire ou de reprendre une typologie, dans le cas d'un tuteur reposant sur une approche *overlay* ou par recouvrement [Vanlehn 88, Nicaud 88]. Les

limitations que l'on rencontre avec une telle approche découlent déjà de celles de la construction de la bibliothèque des erreurs. Une fois cette bibliothèque établie, il faut ordonner cette typologie c'est-à-dire proposer des classifications d'erreurs et positionner les classes ainsi obtenues les unes par rapport aux autres. Que ce soit au niveau du choix du nombre de classes ou de l'ordre proposé entre celles-ci, l'objectivité n'est pas forcément une des caractéristiques principales de cette élaboration. En effet, comment justifier réellement un ordre entre les classes plutôt qu'un autre ? ou comment déterminer le nombre de classes intermédiaires qu'il faut proposer pour augmenter l'interactivité système-utilisateur ? Malgré les inconvénients indéniables que sont une objectivité défaillante et une lourdeur dans la mise en place du système, l'intérêt du procédé est non négligeable. Il permet de nuancer et de varier la panoplie des rétroactions et ceci, au travers d'un affinement de la représentation catégorielle des réponses. Dans cette situation, les classes envisagées ne peuvent être que des catégories exclusives où chaque réponse du sujet est cataloguée dans l'une d'elle et une seule, et dans laquelle, chaque élément est équivalent qualitativement à un autre appartenant à la même catégorie.

Dans le cas de données continues, la situation est différente ; il est assez aisé de mesurer des distances entre la réponse du sujet et celle attendue et, de déterminer ainsi un indice de proximité puisque les données sont continues. Cet indice peut alors être utilisé sur des systèmes classiques, c'est-à-dire présentant deux états possibles, ce qui introduit un peu de souplesse. En effet, celui-ci peut intervenir lors de la reconnaissance d'une connaissance en modulant, par exemple, la zone de tolérance ou la rigueur avec laquelle on accepte de considérer que la connaissance est correcte. Cette modulation pourrait intervenir au niveau de la connaissance elle-même mais également au niveau des étapes pour y parvenir. Aussi, l'artefact de ce mécanisme peut être une facilitation de la prise en compte de données bruitées par exemple, que nous avons déjà évoqué et que nous développons plus avant dans la section 6.4. Cette proposition théorique reste néanmoins à expérimenter.

La dernière technique que nous proposons consiste à construire des classes ou des intervalles entre les deux états *correct* et *incorrect*. Les intervalles sont alors délimités par des valeurs du domaine de connaissances. Chaque intervalle correspond à un état qui regroupe un ensemble de données continues. Ces intervalles peuvent être recouvrants ou exclusifs. Dans notre approche, nous avons choisi de constituer des intervalles recouvrants que nous avons modélisés à l'aide d'ensembles *flous* (voir la section 5.2). Chaque catégorie est ainsi une connaissance qualitative qui permet à la fois d'estimer une distance par rapport à la connaissance cible et de moduler les rétroactions envisageables pour enrichir l'interactivité ou l'adaptativité du système à l'utilisateur. Ainsi, dans ce type d'optique, l'erreur, tout comme la connaissance cible, est conçue comme une catégorie qualitative. L'objectif est de détecter et de représenter qualitativement le comportement du sujet. Ceci permet de faciliter la prise en compte du type de réponse en évitant de se focaliser sur les artefacts que sont, bien souvent, les différences quantitatives.

La notion d'ordre sur deux réponses qualitativement différentes.

Dans la section précédente, nous avons présenté l'intérêt de l'utilisation d'une catégorisation qualitative pour la détermination des types de connaissances. Toutefois, pour que cela soit fonctionnel, il est nécessaire d'ordonner les catégories. En effet, comment calculer une proximité ou une distance entre deux points si l'on ne connaît pas l'emplacement d'au moins un des points ?

Si l'on reprend les distinctions établies précédemment, nous proposons deux situations :

- celles mettant en œuvre des données discontinues ;
- celles mettant en œuvre des données continues (on exclut ici la technique de modulation à l'aide de l'indice de proximité).

Pour la première situation, les données étant discontinues et non ordonnées, le regroupement en catégories et l'ordonnement des catégories les unes par rapport aux autres sont arbitraires. C'est le

concepteur du système, aidé des pédagogues, des spécialistes du domaine . . . qui fixe le nombre de classes en fonction de la finesse souhaitée et l'ordre estimé le plus adéquat pour l'objectif pédagogique suivi (le nombre ainsi que la pertinence des catégories elles-mêmes sont déterminés en fonction d'un objectif et non de manière absolue comme cela a été illustré à partir de l'exemple et des expressions de la figure page 118).

Quant à la seconde proposition, celle mise en place dans notre système, l'ordre est fixé par les données elles-mêmes ; les valeurs autour de celles constituant la classe cible forment les classes adjacentes et ainsi de suite vers les extrêmes. Ici l'ordre est objectif. Ce qui est dépendant du concepteur et du spécialiste concerne le nombre de classes et par conséquent, les limites de ces classes.

Il faut toutefois signaler que l'ordre mais également le nombre de classes sont directement dépendants de l'objectif pédagogique instauré et du niveau de l'utilisateur.

En ce qui concerne le nombre des classes, si l'objectif pédagogique est de l'ordre de la découverte ou d'un premier contact de type intuitif avec des notions, l'exigence ou le nombre de catégories peuvent être relativement faibles. Si au contraire, la volonté de l'enseignant est de travailler précisément certaines notions, le nombre de classes peut être conséquent : plus la rétroaction se veut variée et fine, plus le nombre des classes augmente.

Quant à l'ordre des classes, dans le cas de données discontinues, il est fixé en fonction d'un objectif particulier et non en fonction du domaine de connaissances lui-même. C'est à dire que dans l'optique d'un apprentissage sur un domaine particulier, plusieurs ordonnancements sont plausibles ; lorsque votre objectif est l'acquisition de certaines techniques de raisonnement, la rétroaction du système doit porter sur cet aspect et non sur les erreurs de calcul par exemple. Les mêmes connaissances et erreurs, selon les objectifs, ont des importances et des impacts différents. Ainsi, il est intéressant de permettre à un système non seulement d'établir à la demande des classes plus ou moins larges mais aussi de modifier plus ou moins dynamiquement leur ordre en fonction des objectifs. Le coût de mise en place de la détermination des catégories est non négligeable, mais suscite des possibilités d'adaptation du système assez importantes en terme de souplesse et de précision de la rétroaction. Nous pensons d'ailleurs que cette voie doit être et sera explorée dans un futur proche si l'on veut affiner davantage les possibilités de rétroaction en relativisant les erreurs qui ne relèvent pas du domaine traité par exemple.

GEREV : application de l'évaluation initiale

Dans notre système qui a pour particularité de traiter des données continues, la difficulté réside dans la définition des critères qui vont nous permettre de distinguer deux réalisations successives. Nous tentons dans le premier des deux paragraphes suivants de répondre à la question : "Qu'est-ce que deux productions équivalentes ?" Le paragraphe suivant répond, quant à lui, au problème de la détermination qualitative de l'ordonnement de deux réponses différentes.

Deux productions successives : équivalentes ou différentes? Dans la mesure où nos ensembles qualitatifs, les ensembles flous formant la connaissance de référence, sont recouvrants, il n'est pas suffisant d'utiliser le critère d'appartenance. Ainsi, on ne peut dire qu'une réalisation qui présente un degré d'appartenance non nul à un ensemble flou est équivalente à une autre réalisation lui appartenant également, tout au moins de manière partielle. Il est nécessaire de s'appuyer sur d'autres informations telles que les valeurs de ces degrés d'appartenance. Différents cas doivent être envisagés pour déterminer l'équivalence entre deux productions :

- les réponses du sujet, notées $p(1)$ et $p(2)$, ne présentent pas de degrés d'appartenance à des ensembles communs. Nous proposons à titre illustratif pour $p(1)$, le vecteur $(1; 0; 0; 0; 0)$ et pour $p(2)$, le vecteur $(0; 0; 0,65; 0,4; 0)$. Les deux productions sont considérées comme distinctes ;

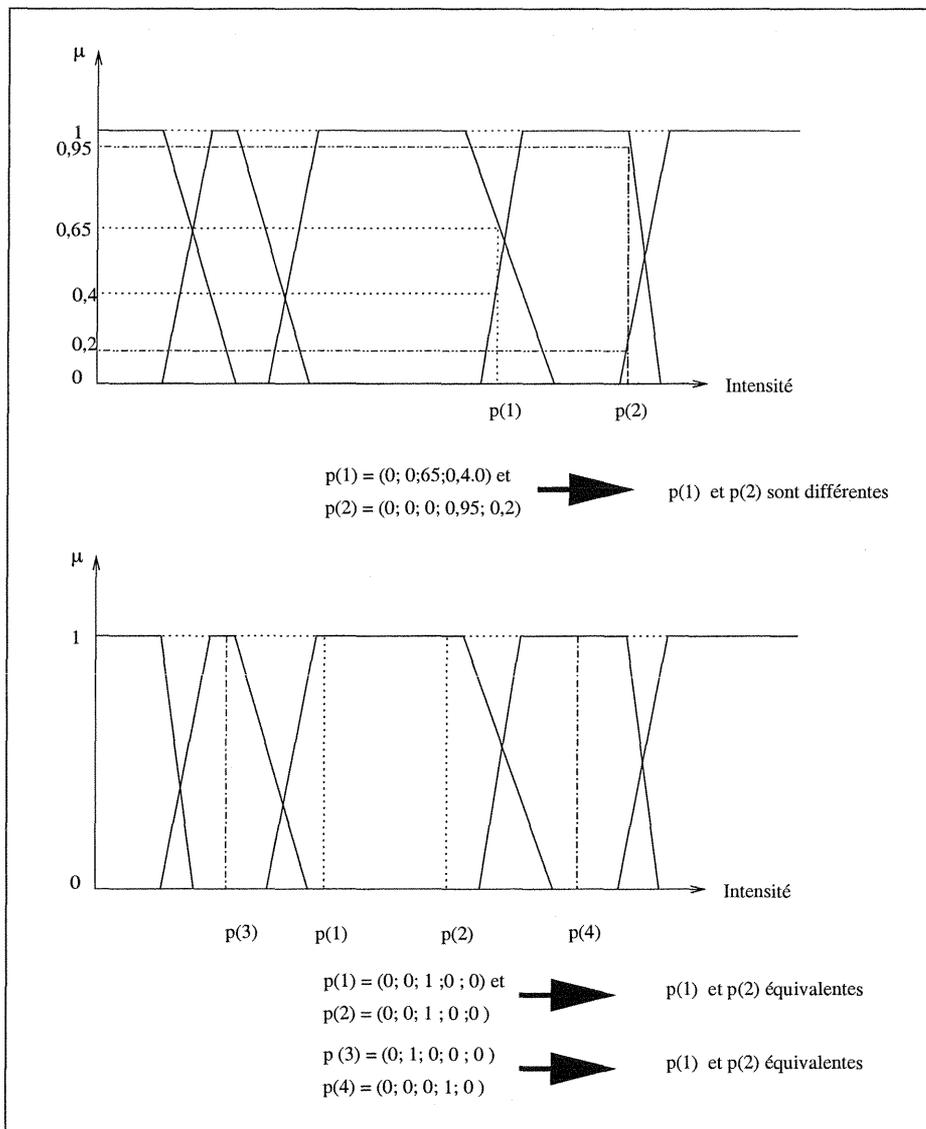


FIG. 6.2 – Deux cas : réponses équivalentes, réponses différentes

- les deux réponses successives du sujet présentent tous deux précisément les mêmes degrés d'appartenance (0; 0,6; 0,7; 0; 0). p(1) et p(2) sont équivalentes et égales ;
- les deux réponses du sujet présentent une appartenance de 1 dans la même catégorie. p(1) et p(2) sont équivalentes malgré des valeurs numériques initiales différentes (figure 6.2) ;
- les deux réponses successives présentent une appartenance de 1 dans des catégories équivalentes. p(3) et p(4) sont équivalentes malgré des catégories d'appartenance différentes ;
- les réponses du sujet présentent une appartenance aux mêmes ensembles mais les degrés d'appartenance varient. Nous avons choisi de considérer une variation de plus ou moins $\alpha = 0,1$ sur chaque ensemble considéré qui pourra être modulée en fonction de l'expérience ; cette variation est un seuil paramétrable. Au delà de cette valeur, les réalisations sont considérées comme différentes (ce point est illustré sur la figure 6.2).

Comme on peut le constater dans l'algorithme 1, l'égalité qualitative entre deux vecteurs, traduisant pour nous deux productions vocales, met en comparaison ces vecteurs dont les composantes deux à deux

ne doivent pas varier de plus d'un seuil α prédéfini. Cet α peut être considéré comme indépendant de i , indice de l'ensemble flou E_i correspondant.

Avant de poursuivre notre exposé, il est important de revenir sur le seuil de variabilité α (que nous avons choisi de fixer momentanément à 0.1) dans l'appartenance aux ensembles flous que nous acceptons pour qualifier l'équivalence. Mais, pourquoi une tolérance à la variabilité dans l'appartenance à des ensembles flous?

Algorithme 1 Algorithme de détermination de l'égalité qualitative entre deux réponses : développement du cadre (a) de la figure 6.3

ENTRÉES: deux vecteurs $\mathcal{V}_t = \mu_{E_1}(t), \mu_{E_2}(2), \dots, \mu_{E_n}(t)$ et $\mathcal{V}_{t+1} = \mu_{E_1}(t+1), \mu_{E_2}(t+1), \dots, \mu_{E_n}(t+1)$

SORTIES: un booléen ;

1: Nom de la Fonction : **Fonction vecteur-équivalent** ($\mathcal{V}_t, \mathcal{V}_{t+1}, \alpha$) : Booléen ;

2: **Corps de l'algorithme**

3: Début

4: $ET_{i=1}^n (|\mathcal{V}_{t+1, i} - \mathcal{V}_{t, i}| < \alpha)$

5: Fin

La première partie de la justification porte sur la variabilité elle-même. La parole constitue le matériel sur lequel nous travaillons. La production successive de deux mêmes sons simples³⁷ tel que le /a/ ne donne pas lieu à deux réalisations parfaitement identiques. La variabilité dans la réalisation vocale est une propriété intrinsèque. Le système informatique doit pouvoir en tenir compte dans la mesure où elle est non pathologique. Ce seuil est donc un moyen de prise en compte de cette variabilité intrinsèque.

La seconde partie de la justification s'applique à la manière dont nous mettons en œuvre cette variabilité. Pourquoi l'appliquer sur les ensembles flous et non directement aux valeurs représentées au travers d'un pourcentage ou d'un coefficient de tolérance quelconque comme cela s'observe dans certains systèmes? Si l'on applique un coefficient de tolérance à une valeur, il faut qu'il tienne compte de l'importance relative des écarts entre les différents points. Concrètement, il doit par exemple utiliser le fait qu'un écart de 4 Hz autour d'une valeur de 40 Hz peut être considéré comme négligeable alors qu'il peut ne pas l'être lorsque la valeur se situe autour des 60 Hz. Si l'on veut néanmoins appliquer un indice de variabilité directement sur la valeur, et ceci de la manière la plus objective possible, il faut établir une courbe de perception auditive afin de calculer l'écart pour chacune des valeurs potentielles de l'échelle des décibels. Le résultat d'un tel calcul correspond à une courbe exponentielle qui apparaît être une solution relativement complexe. De plus, ce type de travail est à reproduire pour chaque connaissance manipulée, ce qui alourdit fortement le coût d'implantation du système. Si au contraire on applique un indice seuillé, certes arbitraire mais paramétrable, sur les degrés d'appartenance aux ensembles flous, la difficulté est considérablement réduite tout en prenant en compte les critiques énoncées précédemment. Lors de l'élaboration des ensembles flous par le spécialiste, l'importance relative des distances entre les valeurs est représentée par les ensembles flous eux-mêmes, c'est-à-dire la distribution des données dans les ensembles. Chaque ensemble couvre plus ou moins de données quantitatives et permet ainsi de se soustraire au calcul complexe d'un indice d'acceptabilité des variabilités non significatives. De plus, dans la mesure où nous les avons placés dans ce cadre commun, notre proposition est applicable directement à toutes les connaissances manipulées. Le coût reste donc tout à fait négligeable par rapport à la technique précédemment présentée.

37. Simple au sens où il n'y a pas de phénomène de coarticulation, ou de combinaison de plusieurs sons pour former une syllabe.

Deux productions différentes : qualitativement meilleures ou non ? Nous avons déterminé dans une première phase évaluative l'inégalité des deux dernières productions. La phase à réaliser relève maintenant de l'ordonnancement des données différentes. Ce que l'on appelle ici ordonner réside dans la qualification d'un jugement de valeur qui peut prendre deux états :

- la performance du sujet sur un paramètre donné s'est améliorée entre les deux productions ;
- la performance du sujet sur ce même paramètre s'est détériorée entre les deux productions.

Comme précédemment, le recours aux ensembles flous se justifie par l'aide que nous permet ce formalisme au niveau de cette tâche de comparaison qualitative. Nous posons au préalable un postulat qui est que deux ensembles qualitatifs équidistants de l'ensemble cible sont équivalents ; c'est ainsi qu'ils auront, au préalable été définis avec le spécialiste. La distance par rapport à une référence est mesurée par le nombre d'ensembles situés entre les deux points. Deux catégories séparées de la référence par un même nombre d'ensembles sont équidistants. Ainsi, pour l'aptitude Intensité, cinq ensembles flous sont proposés : "intensité très insuffisante", "intensité insuffisante", "intensité normale", "intensité forte" et "intensité très forte". Leur ordre est dépendant des mesures en décibels (dB). L'aptitude cible de référence est représentée par l'ensemble "intensité normale". Le postulat de base nous permet de dire que les ensembles "intensité insuffisante" et "intensité forte" ou "intensité très insuffisante" et "intensité très forte" sont équivalents. Ainsi, les réalisations catégorisées dans les ensembles "intensité forte" et "intensité insuffisante" sont potentiellement équivalentes, c'est-à-dire ni moins bonnes ni meilleures. Ce préambule nous permet maintenant d'arriver au cœur du problème ; à partir du moment où l'on a les moyens de déterminer la relation d'ordre existant entre les ensembles et entre deux productions issues d'un même ensemble, nous sommes capables d'émettre un jugement qualitatif ayant trait à l'amélioration ou à la détérioration des performances entre des productions successives. Lorsque les deux productions à comparer sont différentes, nous nous intéressons en premier lieu à leur positionnement par rapport à la cible. Si les deux productions présentent des degrés d'appartenance dans la catégorie cible, il suffit de comparer ces degrés d'appartenance ; si le degré d'appartenance de $p(1)$ est supérieur à celui de $p(2)$, ($p(1)$ ayant été produit avant $p(2)$), on assiste à une détérioration de la performance. Si l'une des productions présente un degré d'appartenance non nul à la cible, alors celle dont le degré d'appartenance à la cible est non nul est qualitativement meilleure. En fait on compare dans un premier temps les appartenances aux ensembles en terme de présence ou d'absence (si les réalisations ont plusieurs degrés d'appartenance, on prend l'appartenance à l'ensemble le plus proche de la cible), puis éventuellement les degrés d'appartenance auxquels il faut adjoindre l'information qui permet de connaître si le degré d'appartenance se trouve à gauche ou à droite du noyau du trapèze ; dans la mesure où les degrés d'appartenance sont compris entre 0 et 1, on ne peut déterminer immédiatement la position de la réalisation. Pour ce faire, il suffit de regarder l'ensemble adjacent dans lequel la réalisation est également catégorisée. Nous avons effectivement proposé une contrainte qui est qu'au maximum, une réponse du sujet appartienne à deux ensembles différents. A l'aide de cette technique, il nous est possible de comparer qualitativement presque toutes les productions.

Le "presque toute" fait référence à un cas très spécifique qui ne permet pas au système d'aboutir à une conclusion qualitative ; lorsque les deux réponses successives sont catégorisées avec un degré d'appartenance exactement symétrique par rapport à la catégorie cible, il n'est pas possible de décider qualitativement d'un ordre. Pour illustrer ce point, nous proposons l'exemple d'une première réponse qui pourrait être représentée par le vecteur (0; 0; 0; 0,8; 0,2) et d'une seconde par le vecteur (0,2; 0,8; 0; 0; 0). Pour atténuer la limitation du processus de décision de la qualité d'une réponse par rapport à une autre dans ce cas bien précis, il faut préciser que la succession immédiate de ces deux réponses est très peu probable même si elle n'est pas à exclure de manière théorique.

Nous proposons maintenant une description de la technique (algorithme 2) qui permet la mise en place de distinction qualitative orientée de deux réponses. Le déroulement du processus est le suivant : il

Algorithme 2 Algorithme de détermination de la qualité des réponses : développement du cadre (b) de la figure 6.3

ENTRÉES: Deux vecteurs qui décrivent deux réponses successives du sujet. Chaque point du vecteur correspond à un degré d'appartenance à un ensemble flou.

SORTIES: un booléen ;

1: Soit $\mathcal{V}[i]$ la $i^{\text{ième}}$ composante de \mathcal{V} {c'est-à-dire la valeur de \mathcal{V} pour la catégorie ou l'ensemble i }; c le numéro de la catégorie cible; \mathcal{C}_i la $i^{\text{ième}}$ catégorie; p une production; p_t la production au temps t ; \mathcal{V}_t le vecteur correspondant à p_t

2: **Fonction Evaluation-qualitative-initiale** ($\mathcal{V}_t, \mathcal{V}_{t+1}$): **Booléen** {VRAI = amélioration de la performance et FAUX = détérioration de la performance.}

3: **si** $p_t \in \mathcal{C}_c$ et $p_{t+1} \in \mathcal{C}_c$ **alors**

4: **si** $\mathcal{V}_t[c] - \mathcal{V}_{t+1}[c] < 0$ **alors**

5: VRAI

6: **sinon**

7: FAUX

8: **finsi**

9: **sinon**

10: **si** p_t ou $p_{t+1} \in \mathcal{C}_c$ **alors**

11: **si** $p_t \in \mathcal{C}_c$ **alors**

12: FAUX

13: **sinon**

14: VRAI

15: **finsi**

16: **sinon**

17: **pour** i allant de 1 à $\frac{NBCat-1}{2}$ **faire**

18: {Par souci de lecture, nous proposons que le nombre de catégories soit impair et que la catégorie cible soit centrée}

19: **pour** $\gamma \in [i, -i]$ **faire**

20: **si** $\mathcal{V}_t[c + \gamma] \notin \mathcal{C}_{[c+\gamma]}$ et $\mathcal{V}_t[c + \gamma] \in \mathcal{C}_{[c+\gamma]}$ **alors**

21: FAUX

22: **sinon**

23: **si** $\mathcal{V}_t[c + \gamma] \in \mathcal{C}_{[c+\gamma]}$ et $\mathcal{V}_t[c + \gamma] \notin \mathcal{C}_{[c+\gamma]}$ **alors**

24: VRAI

25: **sinon**

26: **si** $\mathcal{V}_t[c + \gamma] > \mathcal{V}_t[c + \gamma]$ **alors**

27: FAUX

28: **sinon**

29: VRAI

30: **finsi**

31: **finsi**

32: **finsi**

33: **fin pour**

34: **fin pour**

35: **finsi**

36: **finsi**

est nécessaire de regarder dans un premier temps si les deux réponses du sujet sont dans la catégorie cible. Si c'est le cas, il compare les productions entre elles et conclut à une amélioration si la seconde réponse a une valeur d'appartenance supérieure à celle de la première. Dans les autres cas, on va d'abord comparer les catégories par rapport à la catégorie cible ; si la catégorie de la production au temps t_1 est plus proche de la cible que celle de la production au temps t_2 , alors on assiste à une détérioration de la performance. Cette comparaison est réalisée en recherchant pour chaque réponse le premier ensemble au degré d'appartenance non nul en partant de la catégorie cible. Dans le cas de deux réponses détectées dans des catégories équivalentes, on change de niveaux d'analyse et on revient à la comparaison des degrés d'appartenance.

Récapitulatif. Nous proposons sur la figure 6.3 un récapitulatif des traitements qui permettent au système de fournir une évaluation qualitative des réponses du sujet.

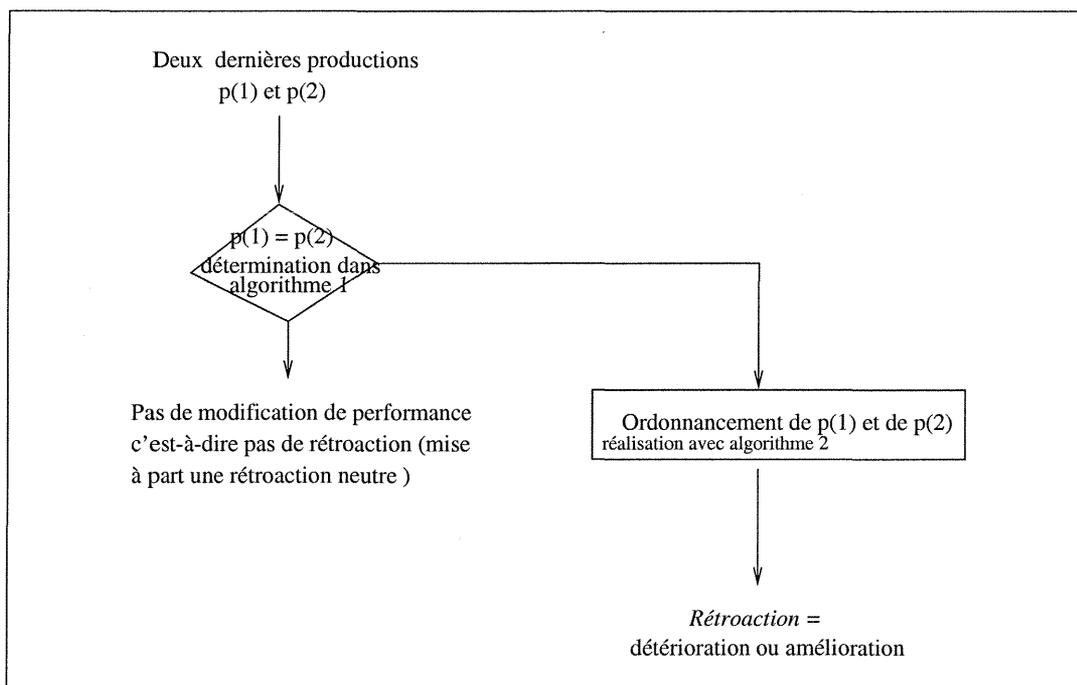


FIG. 6.3 – Schéma de détermination de l'évaluation qualitative initiale

La mise en œuvre de ces traitements est facile et ne nécessite pas un gros investissement en calcul. De plus, étant donné que l'objectif pédagogique est unique avec le matériel utilisé (cf. le paragraphe sur l'ordonnancement page 123), le nombre et l'ordre des classes ou des ensembles constituant chaque connaissance est figé.

Un développement possible serait de dynamiser la construction des connaissances selon éventuellement le niveau de difficulté mesuré pour l'élève pour une connaissance. Lorsque le niveau de l'élève est très faible, il n'est sûrement pas nécessaire de catégoriser les réponses du sujet de manière précise si l'objectif recherché est de proposer une évaluation qualitative des deux dernières productions. Ainsi, pour la connaissance, il peut être judicieux de minimiser le nombre des catégories possibles autour de la catégorie cible. Cette minimisation aboutirait à une qualification grossière mais suffisante. Alors qu'une augmentation du nombre des catégories entraîne une discrimination fine qui n'a de sens que dans le cas d'une évaluation très précise au vue d'une rétroaction très précise. Cela rejoint en fait l'idée de l'utilisabilité et de la pertinence des données recueillies par le système auprès du sujet au niveau informatique

(pourquoi discriminer et identifier finement les erreurs d'un élève lorsque ce dernier n'a pas saisi le principe général du problème que le système lui pose?) et le principe exposé par Rondal [Rondal 83] selon lequel plus le niveau du sujet est faible, plus on est tolérant avec la qualité de la réponse (pourquoi demander à un enfant, par exemple, de prononcer parfaitement le /r/ alors qu'il ne maîtrise pas les sons vocaliques pourtant plus simples à articuler?).

Il reste à ne pas confondre minimisation du nombre des catégories et minimisation des discriminations catégorielles. En réduisant le nombre des catégories affectées à un domaine de connaissances, il est nécessaire d'aménager celles restantes sous peine d'être dans l'impossibilité de discriminer deux comportements lointains. Il est donc essentiel de trouver un compromis qui permette d'assouplir la catégorisation des réponses du sujet tout en donnant au système les moyens de traiter les réponses efficacement par rapport à l'objectif fixé.

Cette modulation dynamique des connaissances de référence en fonction de l'objectif pédagogique fixé constitue l'une des perspectives centrale qu'il nous semble important de développer dans un travail ultérieur à cette thèse.

6.2 Évaluation : une première étape vers la représentation de l'état cognitif de l'utilisateur

Comme nous l'avons dit en introduction, l'évaluation que nous appelons "initiale" n'est pas celle mise en œuvre dans les tuteurs à ce jour.

Classiquement, l'évaluation des réponses de l'utilisateur résulte d'une confrontation entre la réponse du sujet et celles proposées par le modèle de l'expert. Son objectif est d'ailleurs davantage de déterminer l'adéquation éventuelle des connaissances de l'utilisateur avec celles de référence que d'établir une différence qualitative entre la réponse attendue et celle fournie effectivement. L'évaluation qualitative³⁸ n'est au demeurant pas réalisée au sens où nous l'avons défini dans la section précédente. La difficulté de l'évaluation d'une réponse repose sur la définition de la réponse correcte et sur la qualification du type des erreurs.

Avant d'envisager ces difficultés et leurs solutions proposées dans la littérature par rapport à celle mise en œuvre dans notre travail, il faut préciser que l'évaluation est un processus indispensable dans un système interactif. Il a pour fonction essentielle de permettre la représentation de l'état cognitif de l'apprenant et ainsi d'envisager des interactions les plus adaptées possibles à l'utilisateur. Ainsi, cette évaluation doit à la fois être précise et fiable. La notion de précision est cependant à relativiser dans la mesure où les résultats obtenus doivent être exploitables par le système et dépendent de l'objectif pédagogique suivi [Self 88].

A l'issue de l'évaluation, le système peut donc disposer d'informations en termes de connaissances acquises, de connaissances en voie d'acquisition ou non acquises, d'erreurs . . . Les principales difficultés de l'évaluation sont de deux ordres :

- l'aspect représentationnel des connaissances ;
- la qualification des connaissances et, par propagation, la qualification des réponses des élèves.

Le premier point a déjà donné lieu à un développement dans le chapitre précédent dans la section 5.2. De manière rapide, rappelons seulement que, pour évaluer une connaissance, il faut disposer d'une base

38. Nous définissons l'évaluation qualitative en terme de calcul ou de mesure de l'écart estimé entre la réponse du sujet et la réponse attendue.

référentielle à laquelle le système compare et estime les différentes entrées ou réponses de l'élève. Le formalisme représentationnel est un ingrédient important qui doit permettre une expression la plus complète possible et la plus proche du domaine manipulé. Il doit surtout permettre l'expression et la modélisation fidèles de la réponse de l'élève.

Quant à l'aspect qualification des connaissances, il concerne deux étapes successives qui sont l'identification des connaissances utilisées par le sujet puis l'identification des erreurs. Ces niveaux ne sont pas triviaux. Effectivement, lorsque l'on pose un problème à l'élève, le système connaît la ou les réponses attendues, mais non celles mises en œuvre par le sujet. Il convient ainsi de discerner dans le comportement observé la ou les connaissances sous-jacentes. Une fois cette première étape effectuée, le système doit déterminer si ces connaissances sont justes ou erronées, ce qui pose à nouveau quelques difficultés : qu'est-ce qu'une réponse juste ? A un problème posé, il peut y avoir, surtout dans notre domaine d'étude, plusieurs solutions. Elles peuvent être toutes acceptables mais dans des mesures différentes. Si les concepteurs veulent permettre au système d'accepter des réponses sous-optimales ou un grand nombre de réponses pourvu qu'elles soient correctes, il faut lui donner un moyen de les "reconnaître".

Nous ne faisons pas de propositions concernant l'identification des connaissances manipulées puisque notre système traite, mesure et manipule spécifiquement une connaissance primaire par exercice. Celle-ci est fixée, même si par ailleurs, d'autres compétences secondaires interviennent (elles sont, elles aussi, identifier et surveiller dans chaque exercice). En fait, la tâche du sujet est globalement toujours la même ; il doit produire un énoncé verbal qui peut être plus ou moins complexe. Ce qui varie d'un exercice à un autre, est relatif au paramètre sur lequel le sujet va devoir se focaliser, va devoir porter son attention. Le logiciel, GEREV, accorde un statut et par conséquent un traitement particulier à certains paramètres physiques : ceux sur lesquels l'attention du sujet est censée porter. Le système a ainsi pour fonction d'évaluer la performance du sujet sur le paramètre constituant l'objectif pédagogique de l'exercice. Les aptitudes évaluées sont fixées par leur statut (paramètre primaire), même si ces aptitudes sont dépendantes ou évoluent de manière corrélées à d'autres, d'où le recours à un mécanisme d'évaluation des paramètres de statut secondaires (voir page 129). Dès lors, les connaissances à traiter à un instant donné sont identifiées puisqu'elles relèvent d'une analyse prédéterminée en fonction des statuts des paramètres d'un comportement, d'une performance. Le comportement est la production vocale et la performance où les connaissances sont dépendantes de la mise en œuvre d'un nombre de paramètres limité qui a, selon les exercices, une importance variée. Ainsi, la détermination des connaissances, dans notre système, est réalisée en quelque sorte *a priori* lors de l'attribution des statuts des paramètres dans les exercices. Nous ne faisons pas intervenir de processus de détermination automatique des connaissances manipulées par le sujet.

En ce qui concerne la qualification des connaissances, nos propositions sont du même ordre que celles énoncées dans la section précédente : le système compare la valeur de la production obtenue au domaine de connaissances mises en œuvre dans l'exercice. A l'issue de cette comparaison, qui est en fait le processus de qualification des données quantitatives en qualitatives, le système dispose d'un vecteur qui reflète la performance du sujet, de manière absolue. La notion "d'absolu" s'applique au fait qu'à ce niveau de traitement, aucune prise en compte des compétences singulières ne modifie l'évaluation des performances. Ici, il n'est pas question d'interprétation de la réponse en fonction du sujet et de ses possibilités : nous proposons uniquement une représentation de la performance du sujet par rapport à celle attendue.

Une évaluation, dans notre approche, est ainsi définie comme la mesure d'un écart entre la

connaissance cible et la connaissance effective produite par un sujet. Cette mesure peut être quantitative ou qualitative.

Ainsi, nous échappons à la difficulté de reconnaissance ou de combinaison d'erreurs et à toutes les techniques classiquement utilisées dans les TI telles "générer et tester" (page 59), les arbres de décision, la reconnaissance de plans ... en disposant cependant d'informations suffisantes pour que le système puisse établir le caractère correct ou non de la réponse du sujet et qualifier éventuellement l'éloignement de cette réponse par rapport à la cible³⁹. Nous nous plaçons ici, à un niveau d'analyse local ; nous envisageons ainsi ce travail pour un exercice donné, vu comme une entité ponctuelle isolée. Lorsque nous passons à une vision plus globale du système, nos propositions sont affaiblies même si la prise en compte des paramètres secondaires, et donc les compétences sur d'autres paramètres, limitent fortement cet affaiblissement. Les principaux avantages de l'utilisation de catégories qualitatives dans l'évaluation des performances sont :

- l'obtention d'un profil utilisateur global et non un descriptif des erreurs singulières produites. Que ferait un système d'un catalogue d'erreurs particulières obtenues dans des situations particulières ? L'efficacité du tuteur dépend de l'utilisabilité des informations modélisées dans le profil et donc, d'une certaine manière, de leur généralité ;
- la perspective d'obtenir une évaluation en termes qualitatifs de la forme "c'est presque correct" plutôt qu'en correct, incorrect ;
- la perspective d'obtenir une évaluation qualitative graduelle en fonction de l'objectif pédagogique ;
- ce type de modélisation et d'évaluation permet également, au niveau de la synthèse des connaissances sur l'élève, de limiter le bruit (voir section 6.4) par exemple.

Ce type d'approche est facilitée par le caractère continu et ordonné des connaissances. Toutefois, nous pensons qu'il doit être possible de reprendre le principe avec des connaissances plus formalisées ; lorsque pour le domaine de connaissances considéré une typologie des erreurs est proposée, il peut être intéressant de les organiser à l'intérieur de catégories qualitatives⁴⁰. Ainsi, l'évaluation de la réponse de l'élève consiste en une représentation catégorielle (une catégorie peut contenir des informations assez variées telles que des plans, des morceaux de plans, des types d'erreurs...). Le système compare les catégories entre elles et non les réponses elles-mêmes. Si les catégories sont ordonnées, il est ensuite aisé d'estimer ou de mesurer l'écart entre les catégories cibles et effectives. Le principe de la mise en place d'un tel mécanisme d'évaluation est décrit dans la section précédente intitulée "Évaluation initiale" en modifiant toutefois une donnée : la réponse de l'élève est comparée à la réponse idéale attendue. Quelques tentatives de qualification qualitative des solutions proposées apparaissent dans la littérature [Carpentier 98]. Dans le travail de Carpentier [Carpentier 98], l'idée est de déterminer, indépendamment du caractère correct de la solution proposée par l'élève, la qualité de la solution. Ce travail a pour domaine d'application un domaine très formel, la géométrie. La qualité de la réponse du sujet est mesurée grâce à un critère qui est la longueur de la démonstration en termes de nombre de pas pour aboutir à la conclusion.

Cette notion de détermination de la qualité des solutions sur des domaines formels constitue un prolongement intéressant à envisager. En effet, comme nous l'avons déjà discuté à maintes reprises pour des connaissances non formelles, il est indispensable de dépasser la simple détermination du caractère correct de la solution et de se diriger davantage vers une prise en compte de sa qualité, même si celle-ci est forcément subjective ou tout au moins dépendante des critères d'estimation.

39. La "cible" est à entendre ici en terme de connaissance que le sujet doit atteindre idéalement. La notion de connaissance cible correspond en fait à celle de connaissance de référence.

40. Voir le développement proposé dans la section 6.1

Au niveau applicatif, notre évaluation de la réponse de l'élève par rapport à celle de l'"expert" se résume en une qualification de la réponse sous forme d'un vecteur. Ce vecteur modélise le comportement observé selon un paramètre donné. Le processus d'évaluation que nous avons mis en place est ainsi à la fois très simple et fiable. En effet, il ne nécessite pas toutes les techniques de détermination des connaissances ou de déterminations des erreurs que nous avons évoquées. De plus, il présente une fiabilité qui est constante au sens où, quelles que soient les données d'entrées, la construction du vecteur, c'est-à-dire l'évaluation, présente toujours le même degré de subjectivité ou d'objectivité. La subjectivité (ou l'objectivité) de l'évaluation est relative à celle inhérente à l'élaboration du domaine de connaissance et donc à la construction des ensembles flous pour chaque connaissance. De plus, la qualité de la solution est modélisée et utilisée par le système.

6.3 Évaluation à deux niveaux : les facteurs primaires et secondaires

Outre ce premier niveau d'évaluation qui correspond à l'évaluation de la connaissance à manipuler dans la tâche sélectionnée que nous appelons évaluation de la tâche primaire, nous proposons un second niveau d'évaluation : celui de la tâche secondaire.

Ce second niveau d'évaluation trouve ses racines dans deux constats. Le premier relève d'une idée évidente qui est que lorsque l'on résout un problème particulier, plusieurs connaissances interviennent à des degrés divers dans la constitution de la solution. Par conséquent, il est nécessaire de tenir compte et d'évaluer ces différentes manifestations du comportement. Dans la mesure où, comme nous l'avons signalé, l'intervention des paramètres présente des impacts variés en fonction de la tâche en cours, nous en proposons une estimation graduelle.

Le second constat porte sur l'idée qu'une acquisition de connaissance n'est pas instantanée. Elle nécessite du temps et une mise en œuvre dans des situations variées. Ainsi, lorsque la tâche à réaliser constitue un problème, cela traduit le fait que les étapes à mettre en jeu ou les connaissances nécessaires à l'élaboration de la solution finale ne sont pas correctement acquises. Dans une situation d'enseignement, informatisée ou non, les exercices et problèmes soumis à l'élève mettent en œuvre des connaissances en cours d'acquisition. Le tuteur⁴¹ associe bien souvent un exercice et une connaissance. L'échec ou la solution erronée proposée par l'élève peut relever de deux situations distinctes. La première résulte d'une non-maîtrise de la compétence en cours d'acquisition ; celle-ci conduit alors à des erreurs. La seconde situation se rencontre lorsque les compétences considérées comme acquises précédemment influent sur la réalisation de la réponse présente du sujet. En effet, nous avons déjà, à différents moments de notre exposé, insisté sur le fait que le comportement actuel, et donc les réponses du sujet, est dépendant des connaissances antérieures. Certaines conceptions du sujet peuvent interférer avec d'autres et conduire à une réponse erronée. Dans ce cas, ce n'est pas l'apport de la connaissance exacte qui permet au sujet de répondre correctement ultérieurement, dans une situation semblable, mais plutôt la prise en compte de la conception qui a conduit le sujet à proposer la réponse erronée. Ici, il faut donc permettre au système de détecter les déficiences relatives à une connaissance déjà traitée. Un des moyens d'assumer ce mécanisme est l'instauration d'une évaluation constante des connaissances antérieures, d'où la mise en place dans GEREV du statut de connaissances secondaires⁴².

Dans la plupart des systèmes informatiques, ces deux niveaux ou situations sont confondus ; effectivement, l'une des phases de l'évaluation est de déterminer les connaissances utilisées par le sujet. Les connaissances utilisées n'ont aucun statut particulier et les concepteurs n'attachent pas des connaissances aux exercices. L'idée de connaissances en voie d'acquisition, de connaissances autres ... est exclue de

41. C'est-à-dire celui qui a pour tâche d'enseigner quelque chose à l'élève.

42. Une connaissance ou un facteur secondaire est ici à rapprocher d'une connaissance antérieure.

ce type d'approche. Pour chaque exercice, le système détermine les connaissances mises en œuvre par le sujet, évalue la pertinence de l'utilisation de ces connaissances dans un tel contexte, et évalue finalement l'application effective de ces connaissances. La conclusion de cette évaluation est classiquement de la forme : connaissances correctes ou incorrectes, utilisées ou non utilisées par l'expert dans un même contexte, etc.

Notre position adopte un point de vue quelque peu différent. Nous nous fondons sur la prise en compte de la distinction des connaissances faisant directement l'objet de la tâche en cours, que l'on appelle les connaissances ou paramètres primaires, des connaissances intervenant dans l'élaboration de la solution mais indirectement impliquées dans la tâche, que l'on appelle les connaissances ou paramètres secondaires.

Nous postulons (voir page 94 pour les hypothèses de base) que les connaissances primaires et secondaires diffèrent par le degré d'attention nécessaire à leur mise en œuvre. Les connaissances primaires sont directement visées par l'exercice ; leur utilisation requiert une attention relativement soutenue puisqu'elles sont censées être en voie d'acquisition. Les connaissances secondaires, quant à elles, sont théoriquement acquises, ou leur niveau est tout au moins connu ; l'attention requise et disponible est nettement plus faible que dans le cas précédent.

6.3.1 Les avantages de cette distinction

La prise en compte de ces différentes connaissances est réalisée dans la plupart des tuteurs existant sans avoir recours à une distinction en niveaux, en statuts, en processus attentionnels. Quels sont les gains qui permettent éventuellement de justifier cette distinction ?

Pas de détermination des connaissances ! Le premier avantage de cette distinction est que le système ne doit plus déterminer la connaissance utilisée puisqu'à une tâche sont attachées une connaissance primaire et d'autres secondaires. Ces dernières sont considérées comme connues par le sujet. Toutefois, on peut envisager une maîtrise partielle de certaines d'entre elles dans le cas où leur niveau de maîtrise est connu précisément du système. L'utilisation d'une connaissance secondaire partiellement acquise peut conduire à des réponses erronées mais compréhensibles et explicables dont le système doit pouvoir tenir compte dans l'élaboration d'une évaluation de la solution finale du paramètre en cours d'acquisition (paramètre primaire). Les causes de déficiences étant relatives à deux sources, il faut pouvoir déterminer qui des connaissances primaires ou secondaires est la conséquence éventuelle d'une limitation de performance dans la solution terminale.

Distinguer l'essentiel du reste ! En distinguant la connaissance primaire qui constitue l'objet même de l'exercice des connaissances secondaires, il est possible de conclure à une maîtrise de la connaissance primaire malgré une solution terminale imparfaite. Cette technique ou méthode d'attribution d'un statut particulier aux connaissances mises en œuvre dans les exercices permet, après la phase évaluative, une adaptation du guidage de l'utilisateur et une modélisation plus efficace de ses connaissances réelles et ceci de manière somme toute assez simple. La distinction entre connaissances primaires et connaissances secondaires permet d'adapter ensuite le contrôle, les conseils, en un mot l'adaptation de la rétroaction en fonction de la tâche et non d'envisager l'état de connaissances de l'utilisateur dans sa globalité. Ainsi, le système peut évaluer les connaissances effectives visées par la présentation d'une tâche et non le niveau de "connaissances globales" du sujet. De plus, étant donné qu'une performance doit toujours être relativisée par rapport à la tâche et à son objectif, il est nécessaire de distinguer l'objet même de la tâche (le paramètre primaire) des artéfacts issus de sources autres (paramètres secondaires).

Les tuteurs existant actuellement sont conçus pour des élèves ayant des acquis, un certain niveau . . . et visent des acquisitions spécifiques. Ils ne permettent pas de distinguer les connaissances les unes par rapport aux autres. Chaque connaissance mise en œuvre est pertinente ou non pertinente par rapport à la situation, présente un caractère correct ou incorrect mais n'a pas un statut différent d'une autre. La distinction statutaire des paramètres permet d'avoir la possibilité de ne tenir compte que des erreurs ou des absences de connaissances dans le tuteur et/ou de moduler l'évaluation des connaissances en fonction de la tâche ou de l'objectif pédagogique.

Acquis, non acquis, en voie d'acquisition ? Une des questions que l'on pourrait se poser est : pourquoi avoir postulé une variation du degré d'attention en fonction du statut de la connaissance selon la tâche en cours ?

Ce postulat repose sur l'idée qu'une connaissance acquise réellement [Anderson 85a] est une connaissance automatisée et généralisée. L'hypothèse d'acquisition des connaissances correspond en fait à une évolution des connaissances vers la globalisation (voir les pages 30 et 100). Ainsi, une connaissance réellement acquise nécessite peu d'attention et, est peu sensible aux contextes d'utilisation puisque suffisamment abstraite pour être détachée des contingences des situations. Cette abstraction ou généralisation doit être vue, à notre sens, comme la construction d'une sorte de prototype. Ainsi, même si les réalisations sont dépendantes du contexte, la compétence en est distincte. Les connaissances primaires sont des connaissances en voie d'acquisition. Le sujet les utilise en mobilisant une attention assez élevée. L'attention disponible pour une ou des autres tâches est alors restreinte (les ressources attentionnelles étant limitées). Dans ce cadre, on estime qu'une diminution de performance lorsque la connaissance prend un statut de connaissance secondaire est interprétable en termes d'attention insuffisante et donc de connaissances partiellement acquises⁴³. L'attention nécessaire à l'utilisation d'une connaissance non automatisée est insuffisante et conduit alors à des erreurs révélatrices de leur niveau d'acquisition.

La justification ultime, à notre sens, de la distinction de niveau d'évaluation repose sur la vérification de l'acquisition effective de la connaissance. L'objectif d'un tuteur étant d'amener le sujet à l'acquisition réelle d'un certain nombre de connaissances, il apparaît alors que la cible à atteindre se situe davantage au niveau de l'évaluation des connaissances secondaires qui sont des connaissances détachées de leur contexte que de celle des connaissances primaires.

Dans les alinéas de ce même paragraphe 6.3.1, nous avons présenté les justifications et avantages théoriques d'une distinction de statut des connaissances. Outre ceux-ci, des facilités au niveau de l'évaluation en termes d'implantation du système sont notables. Dans la suite de notre exposé, nous proposons l'application de ces deux niveaux d'évaluation dans GEREV.

6.3.2 Facteurs primaires et secondaires : une réalisation concrète.

Comme nous l'avons dit précédemment, chaque exercice traite spécifiquement un paramètre primaire. La rééducation porte alors sur ce paramètre. Les réponses du sujet sont analysées et évaluées pour ce paramètre primaire. Une évaluation initiale ainsi qu'une évaluation classique sont mises en œuvre. Ces deux phases permettent de renforcer positivement ou négativement le sujet sur l'évolution de son comportement vocal et de modéliser les compétences de l'élève par rapport au domaine de connaissances. Toutefois, les performances aux connaissances secondaires sont également analysées et évaluées afin de détecter d'une part toutes les causes éventuelles d'erreurs relatives à une connaissance autre que la connaissance primaire et d'autre part, de contrôler la performance d'une connaissance considérée comme

43. Une connaissance partiellement acquise correspond en fait à un certain degré d'abstraction de la connaissance, à un détachement par rapport au contexte et non au caractère correct de la connaissance manipulée.

acquise. Pour illustrer ce point, prenons l'exemple de l'exercice de "Stabilité du fondamental" dans le module sur la voix. L'objectif de cet exercice est de permettre au sujet de trouver sa fréquence fondamentale, c'est-à-dire de parler en utilisant une hauteur de voix correcte (ni trop aiguë ni trop grave pour lui, qui lui demande le minimum d'effort de production et qui favorise l'intelligibilité). Le paramètre primaire est le fondamental noté F_0 . La représentation de la réponse du sujet concernant le paramètre primaire est de la forme

\mathcal{P} pour la fréquence fondamentale notée $F_0 = \langle \mu_{E1}(F_0), \dots, \mu_{Ei}(F_0), \dots, \mu_{En}(F_0) \rangle$
dans laquelle les notations correspondent à celles présentées à la page 105

Dans cet exercice, on a recours à un second paramètre primaire qui contrôle les variations autour du fondamental du sujet. On dispose pour le premier paramètre de deux domaines de connaissance : une distribution des ensembles flous pour les hommes et une autre pour les femmes. Pour mesurer les variations, on a recours à un calcul de *Jitter*. Les productions du sujet sont évaluées entre elles et par rapport à leurs distributions propres. On extrait, à chaque production, un vecteur qui modélise l'appartenance aux ensembles flous pour la connaissance primaire, la fréquence fondamentale et sa stabilité. De manière secondaire, on surveille l'intensité, les deux paramètres interagissant lors d'un effort vocal. La représentation de la réponse du sujet concernant le paramètre secondaire est de la forme

\mathcal{P}' pour l'intensité notée $I = \langle \mu_{E1}(I), \dots, \mu_{Ei}(I), \dots, \mu_{En}(I) \rangle$

Une connaissance ne peut être secondaire selon notre terminologie que si son niveau de compétence est connu. Par conséquent, une connaissance doit avoir été précédemment primaire pour pouvoir prendre le statut de secondaire.

L'évaluation est une étape fondamentale dans la mesure où elle permet, à partir des comportements observés chez le sujet, d'extraire de l'information et des connaissances. Une fois ces connaissances extraites et représentées au travers d'un formalisme particulier, il est nécessaire de les intégrer dans la modélisation de l'élève dont dispose le système pour personnaliser les interactions dans le processus d'enseignement. Le problème de l'intégration de nouvelles données au profil de l'utilisateur, la synthèse des informations, est un problème épineux dans la modélisation de l'utilisateur. Cet aspect constitue la section suivante de notre chapitre.

6.4 La synthèse des informations

Lorsque l'on évalue les comportements d'un utilisateur dans l'optique de modéliser au mieux son état cognitif pour ensuite adapter les échanges utilisateur-système, une étape de synthèse des connaissances est indispensable à l'utilisation du modèle. En effet, comment traiter une liste ou une suite de comportements si ceux-ci ne sont pas organisés, synthétisés ?

Dans cette étape de synthèse, deux problèmes se posent généralement dans les systèmes :

- lorsqu'un tuteur propose un enseignement sur du long terme, c'est-à-dire plusieurs sessions, les connaissances de l'élève évoluent pendant et entre ces sessions. Il est indispensable de tenir compte de cette modification de l'état cognitif au cours du temps ;
- doit-on tenir compte de comportements issus de phénomènes de fatigue, d'inattention ... et comment exclure ou amoindrir les effets d'un comportement suspecté bruité ?

6.4.1 L'évolution des connaissances en fonction du temps

Le mécanisme de base

La méthode de synthèse à laquelle nous avons recours est purement numérique. Elle se rapproche ainsi de celle mise en œuvre dans les systèmes tels que WEST [Burton 82], FBM [Kumycz 92, Webb 93], XTRA-TE ou SHERLOCK II. La technique consiste en fait à calculer une production "théorique" moyenne qui attribue un poids différent selon le temps écoulé. Plus le temps écoulé depuis la dernière production est important, plus le poids de la réponse est faible. Cette décroissance du poids est une modélisation sommaire de la notion d'oubli qui permet au système de fonctionner à partir des productions récentes, censée refléter l'état cognitif actuel ou tout au moins récent de l'élève. La production moyenne théorique du sujet à un instant donné est notée \mathcal{P} . Elle résulte de la fonction proposée ci-dessous.

$$\mathcal{P} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i w_i}{\sum w_i}$$

- p correspond à une production du sujet ;
- n correspond au nombre de productions p pris en compte dans le calcul de \mathcal{P} , c'est-à-dire à toutes les réponses produites dans une session sur cette connaissance primaire ;
- w_i correspond au poids dont les i ème réponses successives sont affublées.

En ce qui concerne le poids qui pondère le temps qui passe, nous le définissons très simplement comme $w_i = a^i$ avec $a < 1$. Ainsi, le rapport entre chaque réponse est maintenu tout en minimisant l'influence des productions anciennes. a correspond à un facteur multiplicateur du rapport existant entre chaque réponse. Ce facteur est modulable et réglable. Nous avons choisi d'utiliser pour celui-ci une constante qui va entretenir entre chaque production la même décroissance quel que soit le moment considéré.

La méthode employée est donc extrêmement simple ; elle correspond à une moyenne pondérée par l'évolution temporelle dans laquelle une réponse a "a fois" plus de poids que la précédente réponse.

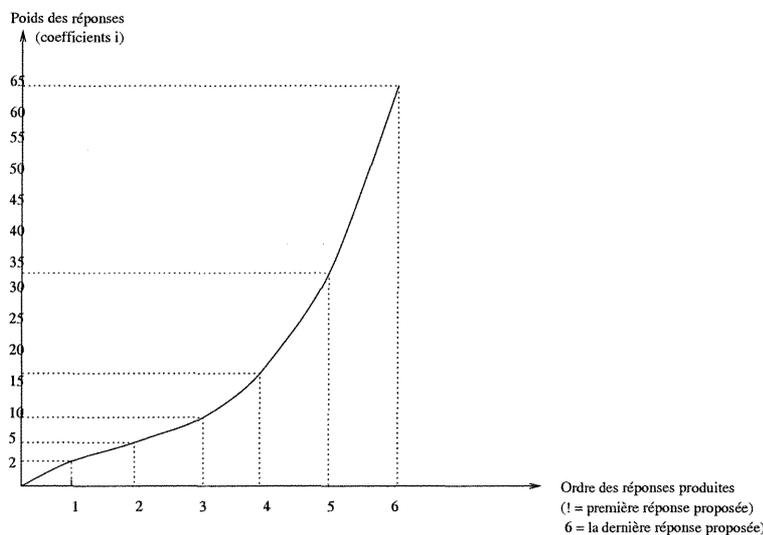


FIG. 6.4 – Représentation de l'évolution du poids en fonction du temps

La synthèse est incrémentale. Quel que soit le nombre de productions, la synthèse est réalisable à tous moments en ajoutant l'évaluation de la réponse du sujet à laquelle un poids est attribué. L'évolution du poids de chaque production en fonction du temps est illustrée sur la figure 6.4.

La modélisation de l'oubli est à rapprocher d'une modélisation par atténuation de la trace. La donnée ne disparaît pas mais son importance est progressivement minimisée. Toutefois, même si son influence s'estompe au fil des arrivées des nouvelles réponses, elle est toujours présente. Au travers de ce choix dans le calcul du poids (w_i), nous avons voulu faire transparaître la nécessaire prise en compte des connaissances antérieures. Le calcul de la production moyenne théorique (\mathcal{P}) est tel que rien n'est réellement perdu ; chaque réponse est intégrée en une représentation moyenne dépendante du passé.

Introduction de la notion de session d'apprentissage

Dans tout processus d'apprentissage s'étalant dans le temps, la difficulté au niveau de la modélisation des connaissances de l'utilisateur dans un système informatique est de concevoir qu'il y a une vie, une évolution de l'état de connaissances en dehors des interactions système-utilisateur.

Le moyen auquel nous avons recours pour introduire la possibilité de bonds qualitatifs ou quantitatifs entre les phases d'utilisation du système est l'introduction de la notion de "session d'apprentissage".

Une session est définie comme une phase délimitée par la connexion et la déconnexion de l'utilisateur au système. Une session est donc une période temporelle continue durant laquelle le système contrôle plus ou moins l'apprentissage en cours.

Les mécanismes d'évaluation et de synthèse que nous avons décrit jusqu'à présent sont situés intra-session. Entre deux sessions, l'intervalle de temps et l'évolution des connaissances peuvent être très variables. L'absence de prise en compte de cet intervalle est artificiel et pose des problèmes de pertinence de la modélisation de l'état de connaissances de l'utilisateur. Ainsi, la production moyenne théorique obtenue lors d'une session pour un paramètre donné, jugée non satisfaisante pour le sujet par le spécialiste donne lieu à un travail spécifique lors de la session suivante. Pour tenir compte de l'intervalle écoulé mais également des données obtenues précédemment, le mécanisme de synthèse fait comme s'il considérait la production moyenne théorique comme une première production obtenue dans cette nouvelle session et non comme la résultante de plusieurs productions antérieures. Par conséquent, elle prend le statut d'une production classique à laquelle, au fil des essais, vient s'ajouter des nouvelles données intégrées dans une production moyenne théorique de la session en cours.

Le mécanisme de synthèse offre un reflet de l'état de connaissances du sujet à une session qui va, à la session suivante, être pris en compte en tant que données antérieures mais non centrale dans l'élaboration de l'état de connaissances pour le paramètre donné.

6.4.2 Prise en compte du bruit ?

Dans GEREV. Quant aux informations bruitées, nous estimons en tenir compte, tout au moins partiellement, au niveau de la catégorisation des productions des sujets ; les ensembles flous modélisent des données imprécises. Ainsi, chaque représentation d'une réponse de l'élève, au travers de son formalisme, englobe une certaine prise en compte du bruit potentiel. Par ce biais, la modélisation de l'état cognitif de l'élève ou de son comportement présente une certaine robustesse. Par conséquent, toutes les réponses de l'élève entrent dans la composition du profil. Dans cette optique, il est assez difficile de justifier le rejet d'une réponse non cohérente avec l'état actuel du profil pour une connaissance dans la mesure où le cadre général du système est la rééducation ; il n'existe, par conséquent, pas forcément d'état comportemental ou de connaissances stables. Aucun critère ne permet de distinguer ce qui appartient au sujet et le représente réellement de ce qui n'est qu'une manifestation d'un artefact. C'est pour cette raison qu'il

nous est impossible d'utiliser le principe de coercion décrit dans la section 3.3.1, et ceci même de manière locale, comme dans les systèmes de synthèse symbolique.

Toutefois, nous avons utilisé un artifice pour ne pas traiter certaines "réponses du sujet" : le sujet peut supprimer manuellement l'enregistrement et le traitement d'une réponse (la réponse venant d'être produite ou en cours de production). Le mobile de cette possibilité est relative au mode d'enregistrement des réponses. En effet, le système ne doit traiter que ce qui est oral et ce qui est intentionnellement une réponse à l'intention du système. Il est nécessaire de supprimer, avant traitement et intégration dans le profil, les réponses qui ne sont pas des réponses du sujet. Outre ces types de productions, et non pas données bruitées, toutes les solutions sont considérées comme reflétant un état de compétence et donc intégrées à la modélisation comportementale de l'élève.

Le bruit : bruit ou information ? Outre les limitations citées précédemment, nous pensons que les connaissances réellement bruitées, c'est-à-dire totalement indépendantes des connaissances de l'élève, n'existent pas. L'inattention et la fatigue, désignées classiquement comme les causes de bruit, sont la plupart du temps, à notre sens, des révélateurs d'états des connaissances profonds. Ces deux points reprennent un peu le même principe idéologique que les critères secondaires : lorsque l'élève dispose de moins d'attention pour des raisons de fatigue ou de surcharge attentionnelle par exemple, des tâches apparemment maîtrisées peuvent présenter des défaillances. Celles-ci révèlent une automatisation partielle des connaissances ou tout au moins, des lacunes au niveau de leur maîtrise. Ainsi, supprimer ces données ou ne les considérer que comme des variations non significatives, non porteuses d'informations, revient, selon nous, à ne modéliser l'état cognitif de l'élève que dans des conditions optimales et donc à ne pas considérer dans sa globalité le processus d'acquisition des connaissances du sujet. Cette position motive le choix de traiter toutes les productions de la même manière, c'est-à-dire en intégrant en temps réel toutes les réponses même si celles-ci ne sont pas cohérentes avec la modélisation du sujet à un temps donné.

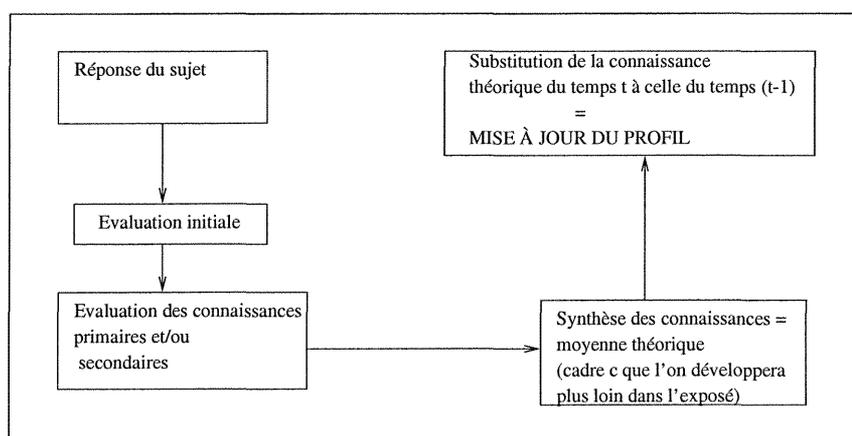


FIG. 6.5 – Schéma des étapes générales dans la mise à jour du profil de l'utilisateur

Comme nous venons de le dire, la synthèse des connaissances, des comportements, est effectuée en temps réel ; après chaque réponse du sujet, la réponse est comparée à la précédente, elle est évaluée et intervient dans le calcul de la production moyenne "théorique". Cette production théorique constitue ainsi un reflet relativement fiable des comportements observés. La synthèse des connaissances intervient au niveau des connaissances primaires mais également au niveau des connaissances secondaires. C'est au travers du processus de synthèse des connaissances que le profil utilisateur est mis à jour comme nous le montrons sur la figure 6.5. A une production correspond une évaluation initiale, une évaluation par rapport à la connaissance de référence, une mise à jour des données et ceci pour les connaissances

mises en œuvre et espionnées dans cette production, c'est-à-dire pour les connaissances primaires et secondaires.

6.4.3 Bilan des processus de modélisation de l'élève-utilisateur

Au point où nous en sommes dans l'exposé, notre système modélise, évalue, synthétise des connaissances. Il est apte à rendre compte des évolutions, des variations . . . , à proposer le profil d'un utilisateur (section 5.3). Il a un comportement cohérent durant les sessions d'apprentissage et, est capable d'intégrer le fait qu'entre deux sessions, du temps et des évolutions de connaissances sont à prendre en considération. Les principaux avantages de nos propositions, jusqu'à présent, concernent la modélisation de l'utilisateur et la mise à jour de son profil. Elles peuvent être résumées par les points suivants :

- une représentation qualitative qui facilite la prise en compte de données telles que le bruit . . . ;
- une représentation qualitative des réponses du sujet qui facilite l'évaluation des réponses en :
 - comparant des catégories entre elles (donc des données générales équivalentes) et non des réponses singulières ;
 - établissant des relations d'ordre entre les catégories et en permettant ainsi une modulation des renforcements proposés, de l'interaction. Il n'y a plus que les possibilités de catégorisation booléenne "correct" et "incorrect" ;
- une évaluation des connaissances à différents niveaux d'abstraction, ce qui facilite la détermination des connaissances utilisées dans une tâche et la prise en compte du niveau d'acquisition de la connaissance ;
- une qualification des réponses les unes par rapport aux autres ;
- une prise en compte de toutes les réponses des sujets dans la modélisation de l'élève au travers d'une conception théorique de la notion du bruit ;
- une introduction de la notion de session qui permet de modéliser l'état de connaissances de l'utilisateur dans une session d'apprentissage et de tenir compte des connaissances du sujet dans la session suivante sans qu'elles soient cependant trop omniprésentes dans l'élaboration du profil de l'utilisateur.

Nous nous sommes doté de techniques et de mécanismes qui permettent au système à la fois de modéliser tous les comportements ou connaissances de son utilisateur, d'évaluer et de synthétiser ces réponses en temps réel, et de mettre à jour la modélisation du profil de l'utilisateur.

Chapitre 7

Guidage : une tâche, un sujet, un conseil

La modélisation de l'utilisateur, ici de l'élève, est une phase indispensable et fondamentale dans l'élaboration d'un système interactif. Pour être efficace, cette modélisation doit être la plus proche de l'état cognitif de l'élève ou de son état comportemental, et ceci à tous moments du fonctionnement du système. L'évaluation et la synthèse sont ainsi des étapes capitales dans la maintenance et la validité de la modélisation. Cependant ces phases ne sont que préliminaires à la mise en place d'une adaptation et d'une interactivité entre le système et l'utilisateur. Nous allons nous pencher dans ce chapitre sur la phase de rétroaction et d'adaptation du système à son utilisateur qui constitue l'aboutissement de notre travail de thèse.

Nous définissons la rétroaction et l'adaptation par la possibilité de proposer de manière automatique la tâche suivante à réaliser et le conseil à fournir à partir de la réponse de l'élève. Nous excluons ainsi les rétroactions programmées à l'avance dans lesquelles la réalisation d'un exercice conduit à un autre sans réellement tenir compte des réponses de l'utilisateur. Par conséquent, nous allons dans le sens d'une recherche d'humanisation de l'enseignement dans lequel les étapes sont prévues de manière globale, c'est-à-dire que l'on fixe les connaissances à maîtriser, les moyens pour les acquérir (les exercices) mais spécifiquement, l'ordre d'exécution, les conseils, les retours fournis dépendent de l'utilisateur. L'objectif n'est donc pas de proposer un système totalement réactif mais bien un système interactif. L'interactivité, nous parlerons dans la suite plutôt de rétroaction et de guidage, doit être envisagée à plusieurs niveaux :

- au niveau des réponses du sujet (globalement, que faire lorsque le sujet propose une réponse particulière) ; ce premier niveau est défini comme partiellement réactif ;
- au niveau du sujet lui-même ; en fonction des compétences du sujet, quelle rétroaction, quels conseils . . . lui fournir. Ici, l'analyse et l'objectif se situent davantage à un niveau interactif.

Les propositions que nous faisons se placent sur ces deux plans d'analyse. Nous considérons successivement dans la suite de notre exposé, le guidage inter-tâche⁴⁴ (entre les exercices) et intra-tâche (dans un même exercice).

Toutefois, avant de poursuivre, nous souhaitons présenter le principe de nos propositions visant à l'humanisation sur un plan théorique. L'idée s'appuie sur deux approches (l'une théorique l'autre empirique) que nous avons précédemment développées à la page 19 ; la première étant celle de Bruner [Bruner 86, Bruner 66] qui propose la notion d'*étayage* et l'autre, les observations de Rondal [Rondal 83]. Rappelons que l'idée de l'*étayage* est qu'il faut ajuster les aides en fonction des connaissances de l'élève et non modifier les connaissances en morcelant l'apprentissage en notions plus élémentaires. Ainsi, plus l'élève est faible, c'est-à-dire moins il a de connaissances, plus il faut lui apporter de l'aide. Quant aux

44. Nous parlons de tâches plutôt que d'exercices afin de disposer d'un terme générique qui nous permette d'englober à la fois la notion d'exercice ou de problème et la notion d'étape à l'intérieur même du problème.

observations de Rondal, il observe que les mères amplifient, mettent en relief les aspects difficiles de la langue maternelle pour de très jeunes enfants, et que cette amplification s'observe de moins en moins avec l'acquisition de compétences langagières⁴⁵. Notre travail repose essentiellement sur la mise en œuvre du principe de l'adaptation de l'aide en fonction des compétences de l'élève et donc en l'intégration d'un principe d'étayage dans un système informatique d'enseignement.

7.1 Le guidage : un parcours de tâches

7.1.1 Le guidage inter-tâche

Le guidage inter-tâche, défini comme le passage d'un exercice à un autre, doit être vu ici comme la partie la plus réactive de cette phase de guidage. Effectivement, ce sont les connaissances antérieures, les prérequis indispensables qui conditionnent l'ordre de déroulement des exercices. Ainsi, l'accès à un exercice n'est possible que si les prérequis sont satisfaits.

Une tâche, un exercice : des implications

Dans cette optique, chaque exercice doit être soigneusement pensé et proposé comme une étape dans une progression pédagogique. Par conséquent, nous nous démarquons de la notion d'exercice classique qui la conçoit davantage en terme de média d'évaluation de la connaissance de l'élève. L'exercice ici est défini comme une mise en œuvre d'une connaissance particulière que l'élève doit assimiler au sens de Piaget. Dans cet espace particulier et bien délimité, l'élève doit pouvoir tester différentes solutions, en acquérir et les évaluer afin de les hiérarchiser. Cette hiérarchisation a pour fonction de faire prendre conscience à l'élève qu'il peut exister plusieurs solutions à un problème mais que toutes n'ont pas la même valeur.

En élargissant la notion d'exercice à la notion d'espace d'acquisition d'une connaissance, nous nous approchons des conceptions des "écoles libres" de Freinet, Montessori... dans lesquelles l'acquisition des connaissances se réalise dans un processus d'expérimentation et de recherche de diverses techniques de résolution de problèmes. Le rôle du tuteur se positionne alors dans une optique de guidage semi-directif : il doit guider sans imposer, évaluer sans juger. La mise en œuvre informatique d'un tel tuteur apparaît alors relativement complexe puisqu'il doit, en fait, être capable de qualifier et d'évaluer des solutions variées, comparer qualitativement des solutions entre elles, accepter des solutions non optimales voire partiellement inadaptées, conseiller le sujet et sélectionner en fonction de ces différentes contraintes et difficultés l'exercice suivant dans le respect d'une progression pédagogique cohérente.

Dans l'introduction, nous avons défini cette phase de guidage inter-tâche comme étant la plus réactive. En effet, le seul aspect non gérable et automatisable par et pour le système, à notre sens, dans le guidage est l'élaboration de la progression pédagogique qui doit être fournie au concepteur du système par un expert pédagogue du domaine enseigné, si l'on définit la notion d'exercice comme nous le faisons ci-dessus. La sélection de l'exercice suivant pour un élève coïncide alors avec un parcours de graphe orienté dans lequel un nœud, c'est-à-dire un espace d'acquisition d'une connaissance ou un exercice, ne peut être réalisé que dans la mesure où ses nœuds parents sont satisfaits.

Il est réactif au sens de général au domaine enseigné (non adaptable au sujet) et conditionné par les actions et réalisations du sujet. Cependant, il reste un point important à résoudre dans cette approche : qu'est-ce que la satisfaction des nœuds parents ?

45. Il faut souligner que ce comportement observé chez les mères ou même chez les adultes en interactions avec les jeunes enfants n'est nullement volontaires de la part des protagonistes

Satisfaire les conditions d'acquisition des connaissances lorsque l'on envisage l'enseignement dans un système semi-directif comme celui décrit précédemment est assez problématique. En effet, cela revient à définir des conditions minimales qui sont variables en fonction de l'élève lui-même puisque d'une certaine manière, l'objectif visé est de permettre au sujet de progresser sans toutefois envisager l'acquisition d'une connaissance ou d'un niveau de connaissance strict. Pour résoudre cet aspect, nous avons proposé de considérer qu'un nœud parent est satisfait lorsque l'élève ne fait plus de progrès pendant plusieurs réponses successives ou lorsque, plusieurs fois de suite, la solution proposée correspond à la solution optimale. Nous sommes convaincus que ce choix n'est pas forcément le meilleur, mais il permet néanmoins de tenir compte des possibilités et du niveau de l'élève. Comme nous le verrons ultérieurement dans l'application, entre autres points, ce type de critères de choix n'entrave pas des retours en arrière c'est-à-dire une nouvelle phase d'apprentissage sur un nœud précédemment traité.

Nous développons les aspects d'évaluation, de comparaison et de conseils dans d'autres sections de ce chapitre. Toutefois, pour illustrer la notion d'exercice et de guidage inter-exercice, nous proposons une première description de la mise en œuvre de ces points dans GEREV.

Le guidage inter-exercices ou inter-tâches dans GEREV

Un exercice, une compétence. Dans GEREV, à un exercice correspond un objectif pédagogique qui est la rééducation d'un paramètre primaire. Celui-ci est introduit par un énoncé spécifique, c'est-à-dire la présentation du problème. Il conditionne la visualisation et un type de représentation graphique.

Prenons l'exemple de l'exercice "Maîtrise du souffle". L'énoncé est "Le modèle à suivre vous est présenté en gris. Vous devez essayer de souffler plus ou moins fort de manière à couvrir tous les éléments du modèle" (figure 7.1). La visualisation équivaut en fait à une couverture spatiale qui correspond à la durée et à l'intensité du souffle produit. La figure 7.2 illustre un exemple de visualisation d'une réponse d'un sujet.

Chaque exercice contenu dans GEREV présente une certaine validité. En effet, ceux-ci sont issus d'un travail d'élaboration orthophonique et a, pour ceux déclinés jusqu'à présent (exercices du module sur la voix), donné lieu à une validation empirique dans SIRENE sous le guidage et les conseils de spécialistes orthophonistes. Chaque exercice est conçu comme une progression rééducative classique selon un schéma habituel divisé en phases de sensibilisation, correction, entraînement (page 85). Ainsi, à un énoncé sont associées plusieurs *réalisations contraintes* possibles qui permettent au sujet de tester et d'expérimenter la mise en œuvre de ses compétences. Celles-ci ont pour objectif de corriger les déficiences observées sur le paramètre. Elles sont choisies pour permettre au sujet une prise de conscience de ses limites et pour encourager la mise en place de techniques permettant leur dépassement. Toutefois, leur évaluation est difficile puisque relevant directement du "Modèle-SIRENE". Une mesure de recouvrement du "Modèle-SIRENE", ou du taux de réussite, est proposée au sujet. Elle ne conditionne cependant pas l'évaluation "absolue"⁴⁶ des compétences du sujet pour un paramètre. En effet, quelle est la signification d'un taux de réussite, aussi élevé soit-il, lorsque celui-ci s'applique à un "Modèle-SIRENE" particulier?

Pour approcher la compétence réelle du sujet, des *réalisations libres* sont proposées. Celles-ci ont pour fonction d'évaluer les compétences du sujet sur un paramètre sans lui imposer un modèle particulier. Ce sont elles qui donnent lieu à une évaluation par rapport à la compétence de référence.

Par conséquent, le choix de l'exercice ainsi que l'évaluation reposent sur les réponses du sujet indépendantes d'un modèle rééducatif.

46. Ce que nous appelons ici évaluation "absolue" relève de la comparaison de la performance du sujet par rapport à celle de référence externe au sujet (les connaissances expertes). On le qualifie d'absolu dans la mesure où elle est indépendante du niveau de l'élève.

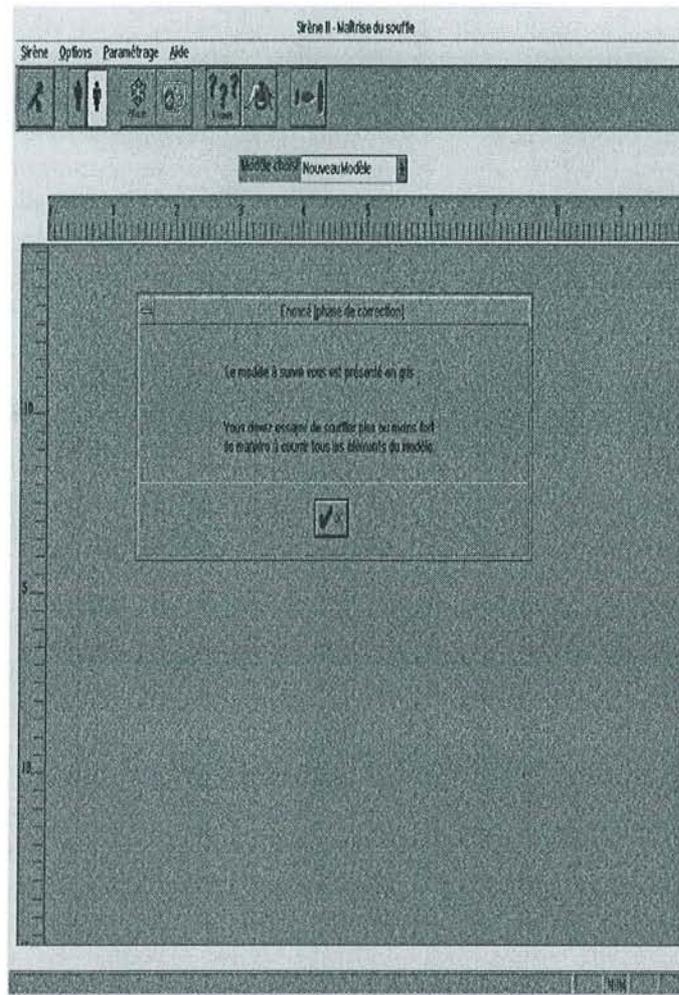


FIG. 7.1 – Énoncé de l'exercice "Maîtrise du souffle"

Un graphe orienté. La progression rééducative n'est pas mise en œuvre uniquement à l'intérieur des exercices. Elles apparaît également dans une vision plus globale du domaine. Effectivement, comme nous l'avons exposé antérieurement, la parole est du souffle sonorisé, du son articulé qui plus est, est doté d'un rythme et d'une intonation. Aborder le problème du rythme avec un sujet ne sonorisant pas son souffle n'a ainsi aucun sens *a priori*.

Un graphe orienté de la progression rééducative a été implanté dans GEREV. Celui-ci existait déjà dans SIRENE mais n'était pas utilisé par le logiciel. Il constitue un enchaînement rééducatif proposé par l'orthophoniste au sujet. Celui-ci a été formalisé et fourni une modélisation de toutes les étapes nécessaires à parcourir entre la mise en place du souffle jusqu'à la parole intelligible et idéale. Une présentation de celui-ci est illustré sur la figure 4.2. Toutefois, il est à signaler que toutes les étapes ou exercices ne sont pas implantés dans SIRENE. En effet, les exercices issus du module sur la prosodie n'ont pas donné lieu à un développement informatique important. Quant au module "Articulation", certains exercices sont en cours d'implantation.

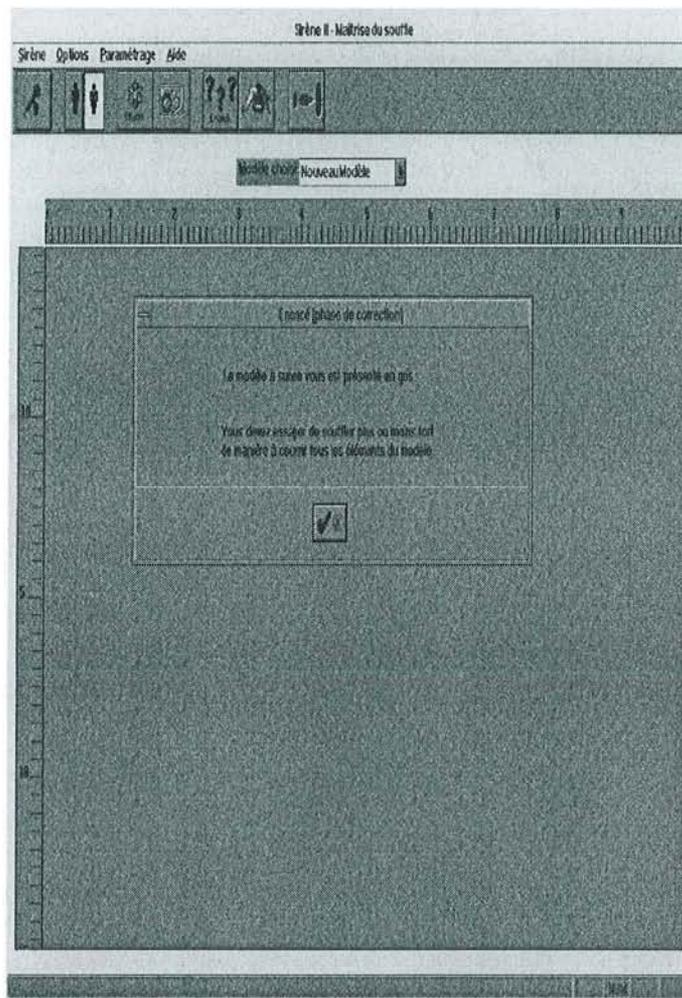


FIG. 7.2 – Visualisation d’une réponse d’un sujet dans l’exercice “Maîtrise du souffle”

Le guidage à deux niveaux. De manière globale, le changement d’exercice est conditionné par la satisfaction d’une des trois condition suivante :

- l’élève a atteint n fois de suite la production cible définie pour le paramètre primaire de l’exercice ; le \mathcal{P} (la production théorique moyenne du sujet pour le paramètre donné) est équivalent à la cible dans la mesure où on estime à l’aide de w_i (décrivant l’importance de la réponse en fonction du temps) qu’au delà des n dernières productions, l’importance des productions antérieures s’atténue ;
- l’élève ne progresse plus sur l’exercice en cours, c’est-à-dire que les performances des n dernières productions sont équivalentes (pour le problème de l’équivalence des productions, voir la section 6.1) ;
- l’élève décide délibérément de sortir de l’exercice.

Lorsqu’une des conditions est satisfaite, le système consulte le graphe précédemment décrit dans la figure 4.2. Il propose alors la liste des exercices réalisables qui peuvent être au même niveau que celui quitté, au niveau supérieur si tous les nœuds parents sont satisfaits, au niveau inférieur lorsque certains embranchements du graphe sont parallèles à celui en cours. Ce dernier cas se rencontre, lorsque par exemple, on considère de manière globale les modules “articulation” et “prosodie”. En effet, l’évolution à

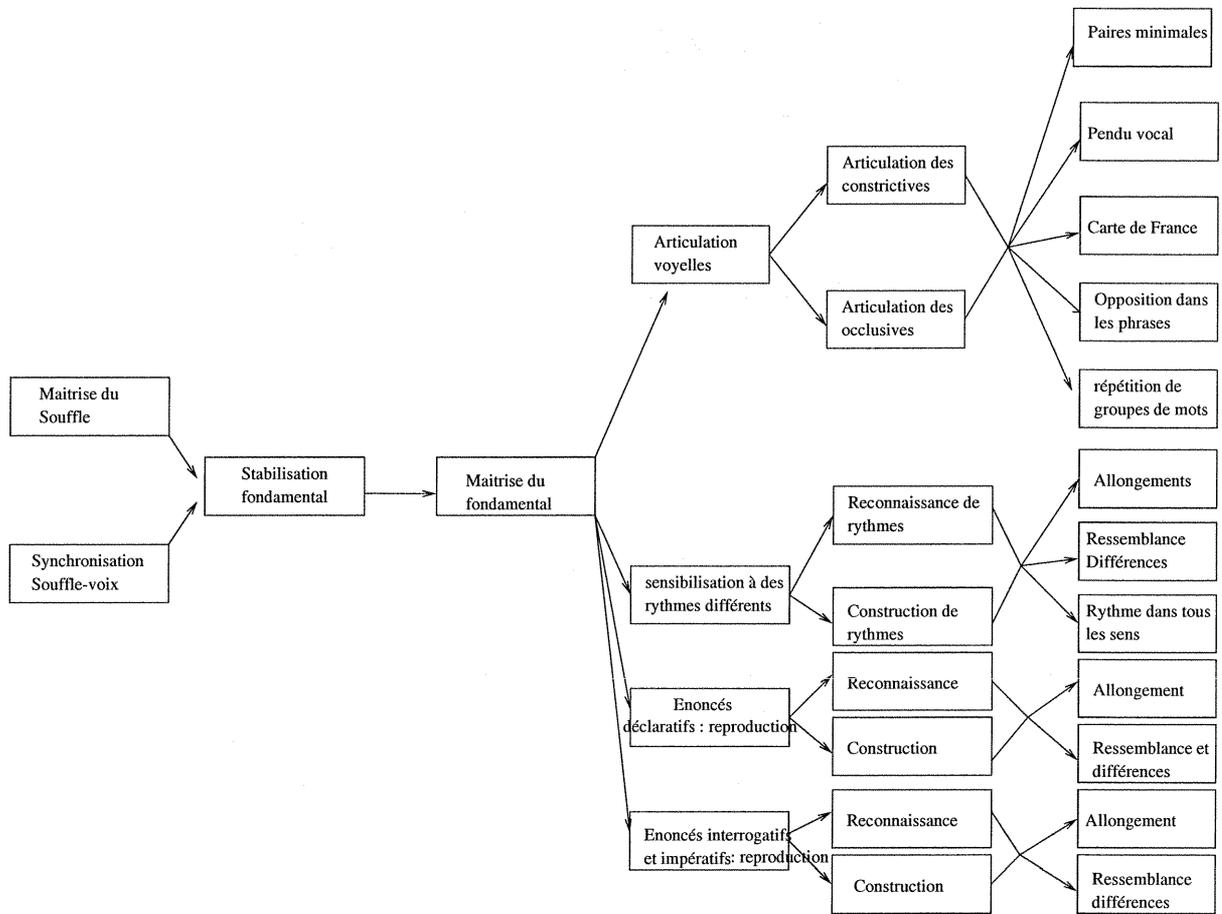


FIG. 7.3 – Schéma du graphe des exercices dans GEREV

l'un de ces modules est indépendante de celle de l'autre. Concrètement, le sujet peut travailler et mener à terme la rééducation de tous les paramètres de l'articulation sans avoir réalisé un seul exercice de la prosodie et inversement. Tout comme il est également possible de mener la rééducation de ces deux modules en parallèle.

Une question reste en suspens dans ce type de fonctionnement : lorsqu'aucun progrès n'est enregistré et que l'on quitte l'exercice avant ce que l'on peut considérer comme l'acquisition de la connaissance, comment est traité l'exercice et comment se passe le guidage dans un tel cas ? La question sous-jacente est : pourquoi permettre à un sujet de poursuivre une progression pédagogique établie alors que le système "sait" que la connaissance nécessaire à la suite de l'apprentissage n'est pas acquise ?

En ce qui concerne la première question, notre proposition est d'enregistrer l'état de connaissance pour ce paramètre dans le profil de l'élève et de poursuivre la progression rééducative en tenant compte du niveau de compétence pour ce paramètre primaire. Nous verrons ultérieurement, lorsque nous abordons le second niveau de guidage, ce que nous appelons "tenir compte du niveau du paramètre". Cependant, la poursuite de la progression est limitée à la session en cours. Une session est restreinte dans le temps et correspond à l'intervalle de temps durant lequel le sujet est connecté au système. Lorsque le sujet quitte le système, la session prend fin. Entre les sessions, le spécialiste consulte le profil de l'élève et indique au système s'il considère la connaissance comme suffisante en l'état actuel de la rééducation, étant donné les possibilités du sujet. Dans le cas d'une insuffisance, lors de la session suivante, le système propose

à nouveau cet exercice dans la liste des exercices à réaliser. Le système dispose de données sur l'état de connaissances de l'utilisateur pour le paramètre primaire impliqué dans cet exercice. Ces données sont représentées par \mathcal{P} (production moyenne théorique) pour ce paramètre. Dans la session en cours, le système va faire comme si la valeur de \mathcal{P} est une réponse du sujet à l'exercice. Ainsi, \mathcal{P} est assimilé à une production du sujet (p_1) et constitue une représentation actuelle de l'état de paramètre pour la session au même titre, après les mécanismes d'évaluation et de synthèse des réponses, que les différentes réponses du sujet (p_1, p_2, \dots, p_n) pour l'exercice considéré.

Il est ainsi à signaler que ce qui importe dans le choix des exercices à réaliser relève de la maîtrise des connaissances mises en œuvre ou du caractère satisfaisant de l'état des paramètres et non de l'état "réalisé" de l'exercice. Au travers des différentes sessions, les mêmes exercices peuvent être repris plusieurs fois. L'enchaînement des exercices respecte toutefois toujours le graphe d'exercice.

En ce qui concerne la seconde question qui porte sur la cohérence d'un tel fonctionnement, nous proposons deux arguments : l'un général et l'autre spécifique au domaine de la rééducation. Le premier point que nous avons par ailleurs évoqué, relève de l'acquisition de nouvelles connaissances. Toute acquisition, même dans un domaine *a priori* non exploité par le sujet, s'implante sur un existant. Il ne suffit donc pas de présenter la connaissance juste pour que celle-ci soit assimilée correctement. Il est indispensable de prendre pour point de départ de l'enseignement les conceptions préalables de l'élève et de les modifier. Dans le cadre de la rééducation, ce principe est mis en pratique au niveau même de la conception de l'intervention rééducative ; le spécialiste initialise le processus rééducatif à partir du niveau actuel du sujet pour un paramètre donné et tente progressivement de l'amener vers une norme. La démarche du rééducateur est donc inverse à celle qui consisterait à présenter la cible, c'est-à-dire la norme, et à l'expliquer en postulant que cette seule explication suffise à remédier au problème et à se substituer à la compétence défaillante.

Si l'on se place dans un cadre piagétien, on s'aperçoit que des connaissances contradictoires peuvent coexister et qu'il est nécessaire de faire prendre conscience de ces incohérences au sujet pour faire évoluer le schéma de pensée de l'élève et de permettre ainsi une assimilation comme nous le décrivons. Nous proposons sur la figure 7.4 un schéma général du fonctionnement de ces deux processus que sont l'accommodation et l'assimilation.

Le processus d'accommodation se met en place en temps réel, c'est-à-dire durant la réalisation de l'exercice, alors que le processus d'assimilation peut être différé (voire page 10 pour une présentation du cadre théorique de ces deux concepts). Il faut donc prévoir dans l'évaluation, et par conséquent dans le guidage, un décalage dans le temps entre l'ajout de connaissances et leur intégration effective. Ce décalage est modélisé, ou tout au moins permis, par cette acceptation momentanée de connaissances et de manifestations qui n'atteignent pas la cible durant la session. Ce point est défendable si cette acceptation est momentanée. L'assimilation n'est pas un processus passif et ne se déroule pas en parallèle. Il peut être déclenché à l'occasion d'autres exercices ou problèmes lorsque le sujet prend conscience des limites ou de l'incohérence de la mise en pratique de ces connaissances contradictoires. Ainsi, l'acquisition n'est pas à considérer comme ponctuelle ; l'évaluation et le guidage dans un tuteur informatique doivent être en mesure de réviser la modélisation de l'élève mais aussi d'accepter des réponses partielles à un moment donné de la progression pédagogique.

Quant à l'argument relatif au domaine de la rééducation, il relève davantage de certaines contraintes fortes que le système doit prendre en compte. Le sujet a des possibilités plus ou moins limitées. On ne peut exiger de lui une réussite à la fin d'un exercice et le contraindre, sous peine d'abandon rapide, à acquérir un niveau de performances idéales. Dans le guidage, il est donc fondamental de tenir compte de ces possibilités et de poursuivre tout au moins ponctuellement la rééducation.

Si l'on revient par ailleurs à la spécificité de l'objectif dans GEREV, qui est l'obtention d'une parole intelligible, il faut se souvenir également qu'il existe des phénomènes compensatoires dans la parole.

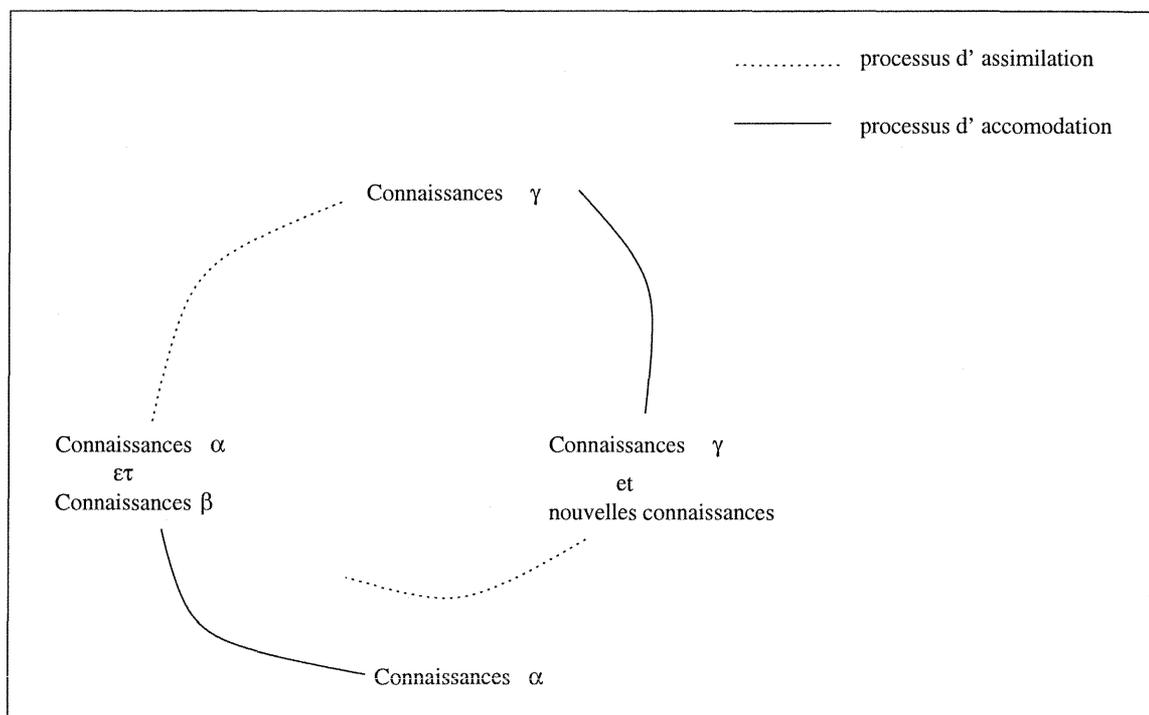


FIG. 7.4 – Schéma général de fonctionnement des processus d'assimilation et d'accommodation

Ainsi, des déficits dans certains paramètres peuvent passer inaperçus ou tout au moins être minimisés par les relais mis en place par l'intervention d'autres paramètres.

Nous proposons sur la figure 7.5 une vision schématique du fonctionnement du guidage au niveau des paramètres primaires. Les arguments ci-dessus nous semblent suffisamment forts pour justifier le type de guidage que nous avons proposé au niveau global. D'autant plus qu'un second niveau de guidage relaye et compense les limitations du niveau précédent. Ce second niveau a pour fonction de résoudre plusieurs problèmes qui sont :

- la prise en compte du niveau réel du sujet dans le déroulement des exercices. Ce point reprend le problème du changement d'exercice alors que la cible n'est pas atteinte ;
- la prise en compte de la modification différée des schémas de connaissances et donc la surveillance de connaissances dont le niveau est préalablement établi ;
- la prise en compte des variations de performance lorsque l'attention du sujet est limitée et ainsi, le problème de l'automatisation des connaissances qui est le but ultime d'un processus normal d'acquisition (cf. page 11).

Récapitulatif du guidage inter-tâche

Ce type de guidage repose sur le profil de l'utilisateur. Il consiste à déterminer l'enchaînement des exercices à proposer au sujet. Il s'appuie sur un graphe d'exercices constitué par un expert-orthophoniste. Chaque nœud représente un exercice qui a pour objectif de mettre en place la rééducation spécifique d'un paramètre. Le passage d'un exercice à un autre est conditionné par l'état des paramètres. Un exercice est conçu comme une étape rééducative qui nécessite des connaissances préalables. Ainsi, un exercice ne peut être réalisé que si tous ses nœuds parents sont satisfaits. Signalons que dans GEREV, la satisfaction des nœuds parents ne correspond pas à la maîtrise de l'aptitude mise en œuvre dans un exercice. Deux

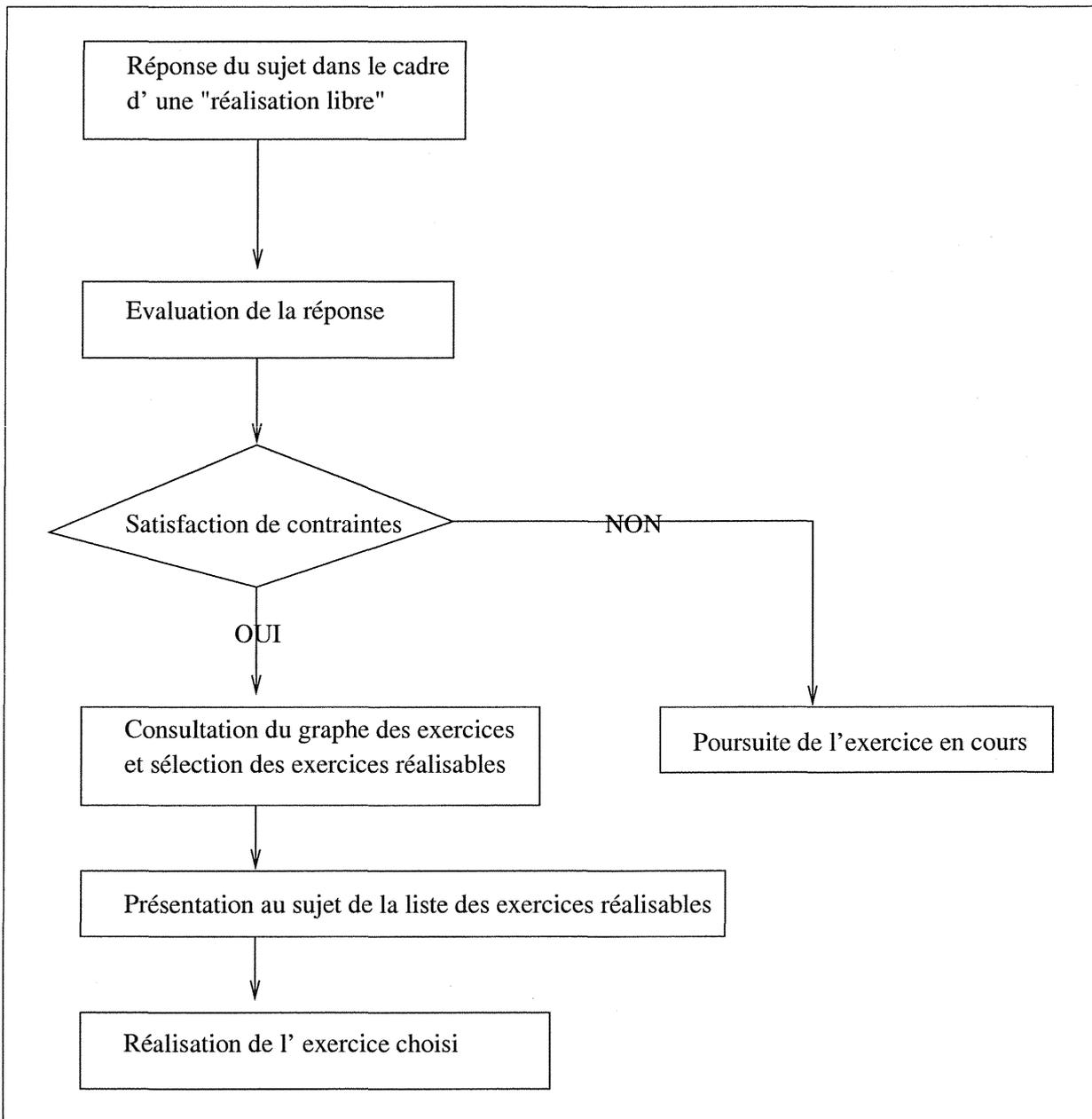


FIG. 7.5 – Schéma de fonctionnement du guidage au niveau des paramètres primaires

niveaux sont ici à discerner : l'inter-session et l'intra-session d'apprentissage.

L'intra-session : le passage d'un exercice à un autre est conditionné par la satisfaction des règles énoncées page 141. Dans une session, le sujet peut réaliser un enchaînement d'exercices sans qu'il soit nécessaire que l'état des paramètres corresponde à l'état cible. Le guidage est local à la session en cours.

L'inter-session : le système va consulter le profil du sujet et déterminer l'exercice à réaliser en tenant compte de l'état des paramètres mais aussi de la satisfaction émise par le spécialiste pour chacun d'entre eux. Si le spécialiste n'est pas satisfait du niveau atteint pour un paramètre, l'exercice attaché à la rééducation de ce paramètre primaire est proposé à nouveau au sujet. L'enchaînement des exercices lors de cette session est toujours déterminé par le graphe des exercices. Les exercices dont l'état des paramètres primaires sont acquis ou satisfaisants ne sont plus proposés au sujet. Si le spécialiste estime que l'état du paramètre obtenu lors de la session précédente est satisfaisant ou ne peut actuellement pas être amélioré, il a la possibilité d'intégrer cette information au système. Dans ce cas, quel que soit le niveau atteint par le sujet, le système poursuit la rééducation en prenant comme référence l'état du paramètre primaire et sans proposer à nouveau cet exercice dans la liste de ceux devant être réalisés lors de la session. Le caractère satisfaisant d'un paramètre n'est pas permanent ; à tout moment, le spécialiste peut le modifier. Ainsi, lors de la session suivante, le système va parcourir l'arbre des exercices et proposer initialement ceux requérant le minimum de prérequis.

Jusqu'à présent, nous avons décrit le mode de fonctionnement du guidage de l'élève au sein des différents exercices. Nous allons maintenant affiner cette description en traitant le guidage à l'intérieur d'un exercice.

7.1.2 Le guidage intra-tâche

Le guidage correspond ici à la sélection des tâches dans un exercice.

Réalisation d'une tâche dans une tâche

Certains des tuteurs existant proposent un guidage s'approchant de ce que nous définissons comme de l'intra-tâche. Ce sont les systèmes qui suivent pas à pas le sujet, comme MENTONIEZH [Py 96], et qui interviennent éventuellement lorsque la voie choisie par le sujet est une voie de garage. Le point de similarité de ce type de système avec nos propositions réside dans la distinction entre la solution terminale et les solutions intermédiaires qui sont pour l'une des étapes pour atteindre la solution et pour les autres des essais successifs de la réalisation du même problème. Toutefois, alors que dans les premiers systèmes les étapes intermédiaires résultent de la recherche des causes d'erreurs éventuelles ou de la volonté d'amener le sujet plus ou moins autoritairement à optimiser la recherche de la solution, dans notre approche, les étapes intermédiaires ont une tout autre fonction. Effectivement, comme nous l'avons développé dans l'exposé du guidage inter-tâches, un exercice est un espace dans lequel le sujet va tester différents comportements ou solutions et renforcer ceux qui lui semblent les plus adaptés. Chaque tâche est conçue à la fois comme un tout et une partie de ce tout ; un tout dans la mesure où elle est une instance réelle de l'exercice et une partie en ce qu'elle n'a de valeur que confrontée aux autres instances et réalisations issues de ces instances.

Ce choix pédagogique, ce type de guidage n'est pas mis en œuvre ou même proposé sous cette forme dans d'autres tuteurs que GEREV. Il est par conséquent assez difficile d'éprouver les apports techniques de notre approche par rapport à l'existant. Notre objectif se situe, ici encore, davantage sur le plan de la conception pédagogique du tuteur que sur celui de l'apport technique au niveau informatique.

La sélection d'une tâche au sein d'un exercice

Chaque domaine de représentation D contient plusieurs ensembles flous E , plusieurs ensembles qualitatifs de niveau de performance. A un ensemble particulier est associé un ensemble de "Modèle-SIRENE". Par exemple, pour l'intensité insuffisante, les "Modèle-SIRENE" proposés ont pour objectif de mettre en évidence cette insuffisance et adoptent ainsi une représentation qui insiste fortement sur cette insuffisance. Concrètement, les ellipses proposées dans l'exercice "souffle" seront alors systématiquement plus hautes⁴⁷ que celles proposées dans la catégorie "normale" ou "forte". Choisir un "Modèle-SIRENE" revient alors à déterminer la catégorie dans laquelle il faut prendre les modèles. Dans une catégorie, tous les modèles étant équivalents qualitativement, la sélection est aléatoire. La détermination de la catégorie est effectuée lors de l'évaluation d'une réponse. Le système regarde si la réponse appartient à la catégorie cible puis aux catégories de plus en plus lointaines. La première catégorie rencontrée dans laquelle le degré d'appartenance est non nul est la catégorie dans laquelle le système "pioche" le "Modèle-SIRENE". Ces "Modèle-SIRENE" ont pour principale fonction dans notre système de mettre en exergue les points sur lesquels le sujet doit porter son attention. Ils conditionnent la partie sensible de la correction des paramètres. Cependant, l'évaluation réalisée par le système pour définir le niveau de performance du sujet est indépendante des "Modèle-SIRENE". La performance est "calculée" sur les productions libres qui sont demandées après chaque "phase de correction", chaque "Modèle-SIRENE". Ce sont donc elles qui permettent le guidage d'une tâche à une autre. Ce sont également sur elles que reposent, comme nous le verrons par la suite, la production des conseils. Ce guidage intra-tâche est illustré sur la figure 7.6.

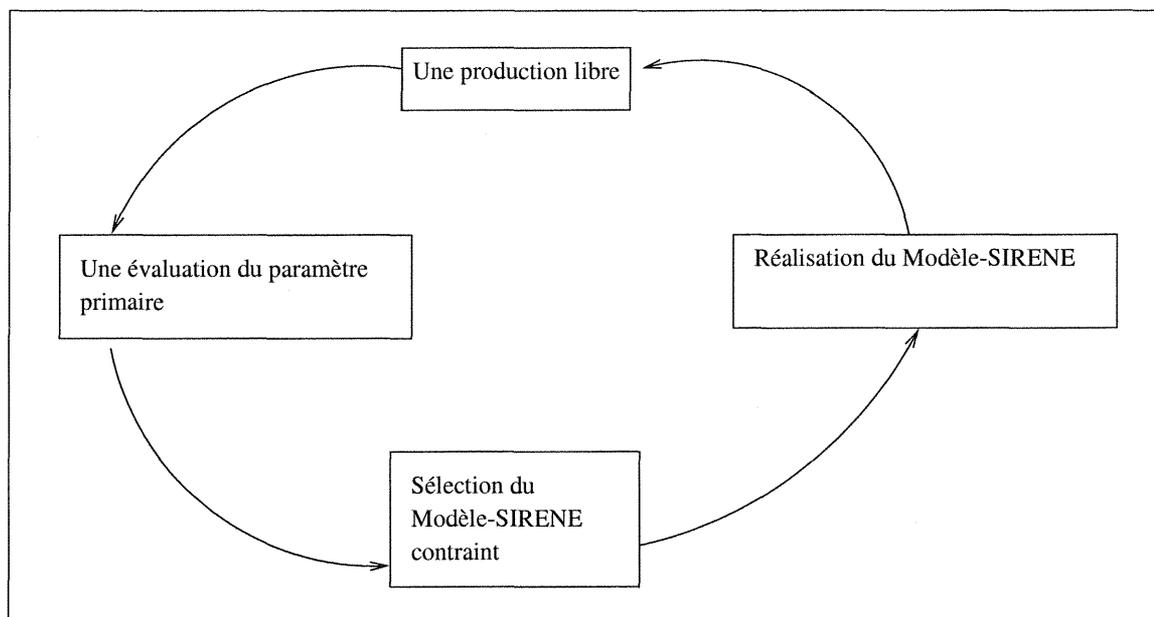


FIG. 7.6 – Schéma du fonctionnement du guidage intra-tâche

Outre les choix émanant de l'évaluation des paramètres primaires et directement liés à l'exercice lui-même, le système peut proposer dans le cadre d'un exercice, un retour vers la rééducation d'un paramètre secondaire. Nous traitons de la déviation de la rééducation d'un paramètre primaire vers un secondaire au niveau du guidage intra-tâche dans la mesure où le système se trouve dans un exercice, à un nœud du graphe, et que le retour vers une tâche autre (rééducation du paramètre secondaire) n'entrave pas ou

47. Ce terme de hauteur est à prendre au sens de distance et non de fréquence.

n'interrompt pas l'exercice en cours.

Cette déviation constitue en fait un mécanisme de contrôle de l'état des connaissances précédemment acquises. Il repose sur l'examen et l'utilisation des paramètres secondaires que nous avons présentés dans la section 6.3. Même si ces objectifs sont ambitieux, son mécanisme est très simple. Il consiste à surveiller les performances obtenues pour les paramètres secondaires d'un exercice et à proposer à l'élève de travailler à nouveau ces paramètres dans le cas où leurs résultats sont significativement inférieurs à ceux obtenus jusqu'à présent. Le caractère significatif est défini ici par un nombre d'itérations présentant le même profil. Une détérioration de la performance conduit à un "détour" par l'exercice dans lequel ils sont primaires. Ce détour prend fin lorsque la performance initiale, celle obtenue lorsque le paramètre était primaire, est atteinte. La mise en œuvre technique de ce principe est schématisée sur la figure 7.7.

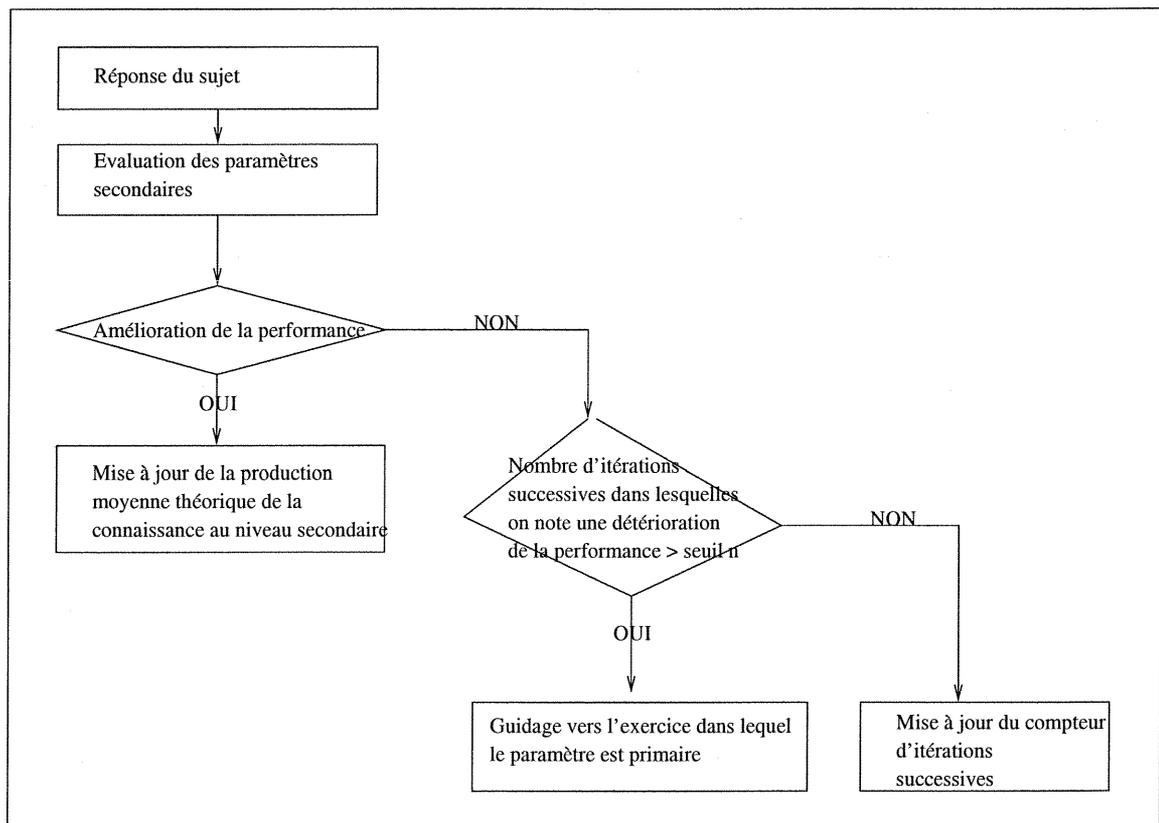


FIG. 7.7 – Schéma de l'influence des paramètres secondaires sur le guidage

La déviation rééducative ne conditionne cependant pas un changement de tâche. Le système ne consulte pas l'arbre des tâches dans ce cas.

Récapitulatif du guidage intra-tâche

Le principe de ce guidage repose sur la sélection et la proposition d'instances différentes d'un exercice particulier. Elles ont pour objectif de permettre au sujet de développer une compétence sur un domaine D . Chaque réponse du sujet sur une réalisation libre est évaluée et conduit à la sélection d'un "Modèle-SIRENE". Ce dernier est choisi pour mettre en exergue les limitations des compétences du sujet pour ce paramètre donné.

Toutefois, la performance obtenue pour un paramètre n'est pas indépendante de celle pour les autres

paramètres. Ainsi, nous introduisons un contrôle de ces derniers par l'intermédiaire des paramètres secondaires. Lorsque le système détecte une défaillance⁴⁸ de l'un de ces paramètres, et ceci de manière significative, il propose au sujet une rééducation de ce paramètre sans toutefois considérer que le sujet quitte la tâche en cours.

La combinaison des mécanismes inter et intra-tâche pour le guidage permet au système de sélectionner la tâche la plus adaptée à réaliser en fonction des performances du sujet.

7.2 Le guidage : un apport d'aides

Lorsque l'on pense guidage, on pense généralement à une topographie c'est-à-dire un parcours de chemin jalonné de différents repères qui sont les exercices ou les tâches dans les exercices. Mais guider, c'est également permettre et aider le sujet à se déplacer plus facilement entre ces repères.

7.2.1 Des conseils, des recommandations, des renforcements : une nécessité, des effets

L'aide, dans notre approche, est relative aux conseils, recommandations et aux renforcements. Nous distinguons ces types d'aide pour des raisons d'effets et d'objectifs. Effectivement, les conseils et les recommandations ont comme objectif et effet d'influer proactivement sur la production de la réponse du sujet alors que les renforcements ont un impact rétroactif en renforçant la réponse venant d'être émise.

Les conseils et les recommandations. Ils ont pour objectif de guider le sujet vers la ou les bonnes réponses. Ils sont indispensables au sujet parce que celui-ci ne peut découvrir seul la solution, et ceci quelle que soit la méthode pédagogique adoptée. Ils doivent être adaptés aux performances du sujet et ainsi différenciés en fonction de celles-ci. La distinction que nous faisons entre les notions de recommandations et de conseils réside dans leur dépendance par rapport à la réponse de l'individu. En effet, les recommandations sont des aides à la production de la réponse correcte du type "Pour prononcer le son /o/, il faut que les lèvres soient arrondies, que la langue soit postérieure, . . .". Elles sont indépendantes de la réponse de l'élève. Elles fournissent au sujet le mode d'emploi pour atteindre la réponse souhaitée. Les conseils, dans notre système, sont quant à eux des aides qui, à partir de l'analyse de la solution proposée par l'élève, apportent les informations nécessaires à mettre en œuvre pour que la prochaine solution du sujet s'approche de la solution désirée. Par exemple, si la tâche demandée au sujet est la prononciation du son /i/ et que la production obtenue est plus proche du son /e/ que du son recherché, le conseil à fournir sera de la forme "la position de la langue doit être un peu plus haute".

Le procédé choisi pour rendre possible cela est tout à fait comparable à celui du choix des tâches ; les conseils ou recommandations sont attachés aux catégories qualitatives. Ainsi, lorsque la réponse du sujet est catégorisée, le système fournit au sujet le conseil dépendant de l'évaluation. Ce type d'approche au niveau de la sélection des conseils n'est pas fondamentalement nouvelle. En effet, dans un certain nombre de tuteurs, les conseils sont adaptés à l'erreur produite. A un type d'erreur correspond un conseil. Si l'on applique ce principe à des typologies de réponses des sujets que l'on a représentées sous la forme d'ensembles flous, on obtient notre technique de sélection et d'adaptation des conseils en fonction des réponses des sujets.

L'effet des conseils est censé être rétroactif : la présentation d'un conseil après une réponse est censé avoir un effet sur la réponse elle-même. Ce point nous semble délicat ; un conseil est par définition une aide, une description d'étapes en vue de faciliter le comportement à venir. Son effet est proactif par

48. Une défaillance est définie ici par une performance inférieure à celle obtenue pour ce même paramètre dans un état primaire.

essence. Par conséquent, la production de conseils doit avoir lieu avant la résolution de la tâche et non après si l'on veut qu'elle soit efficace, qu'elle ait réellement un effet sur la réponse.

En ce qui concerne la mise en place de nos conseils, nous les proposons avant la réalisation d'une production et non après afin que le sujet puisse expérimenter immédiatement les effets des conseils. Si ce point n'est pas habituellement respecté, nous pensons que cela est dû au fait qu'il n'existe, dans les tuteurs, pas forcément plusieurs tâches qualitativement équivalentes qui permettent l'évaluation du niveau du sujet, la présentation d'un conseil, la mise en application de ce conseil . . .

L'adaptation des conseils au niveau de l'élève est réalisée à partir des réponses précédentes. nous faisons effectivement une hypothèse concernant la dépendance des réponses du sujet : les productions à venir sont considérées comme résultantes du niveau et de l'enseignement antérieurs. Ainsi, le recours au niveau de l'élève pour la sélection du conseil approprié à la tâche présente nous apparaît comme peu coûteux en termes de validité.

Les renforcements. Le renforcement, ici, est l'événement qui suit la réponse et non la procédure qui est utilisée. Concrètement, cela revient à proposer une évaluation de la réponse produite non par rapport à une référence experte mais par rapport à la réponse précédente du sujet lui-même, à une référence internalisée du sujet. L'énoncé de l'évaluation peut être positif lorsque l'encouragement vise à faire augmenter la fréquence du comportement observé ou négatif lorsque l'on veut faire disparaître le comportement. Ces encouragements sont possibles grâce à une évaluation relative et qualitative de la réponse ; ainsi, le système propose une évaluation totalement adaptée à l'utilisateur. Ils ont néanmoins un impact au niveau motivationnel en proposant un renforcement immédiat du comportement produit.

L'introduction des renforcements dans un tuteur sous cette forme est nouvelle et intéressante. Nouvelle dans la mesure où l'évaluation des réponses du sujet se fait toujours par rapport à une référence extérieure au sujet et intéressante sur le plan de *l'humanisation de l'évaluation* et de la prise en compte de l'aspect émotionnel comme nous le voyons page 150. L'aspect de l'internalisation de la référence fait échos à la volonté de prendre en compte les conceptions du sujet sur un domaine dans l'acquisition de connaissances le concernant.

Les renforcements ont, contrairement aux conseils, un effet rétroactif sur le comportement. Ils visent à modifier la fréquence d'apparition du comportement renforcé. En effet, le seul fait de faire suivre la réponse d'un événement agréable entraîne une augmentation de la fréquence d'apparition de cette réponse ; à l'inverse, faire suivre une réponse d'un événement désagréable entraîne une diminution de sa fréquence d'apparition. Une félicitation ou une évaluation de la forme "c'est mieux que précédemment, continuez !!" est émotionnellement perçue comme un événement agréable, et a donc un effet non négligeable sur l'apprentissage de la connaissance en question.

La production de conseils et de renforcements. Nous adoptons une description chronologique de la mise en œuvre de la production de conseils et de renforcements dont nous présentons les tenants et aboutissants sur la figure 7.8. Nous envisageons ainsi dans un premier temps les conseils.

Pour chaque domaine de connaissance D , des ensembles flous E sont déterminés. A ces ensembles, le système associe des conseils qui sont dans le cas de l'exercice sur le souffle pour l'ensemble "intensité insuffisante" : "Inspirez avant de commencer . . .". Le sujet dispose ainsi de recommandations concernant la production de la réponse qu'il a à effectuer sur un modèle bien particulier, un Modèle-SIRENE adapté au niveau de performance du sujet. Pour chaque connaissance, il y a donc $i - 1$ conseils différents avec i représentant le nombre de catégories contenues dans la connaissance. Les conseils visant à donner une aide de réalisation à la réponse, lorsque le sujet atteint un niveau répertorié dans la catégorie cible, il

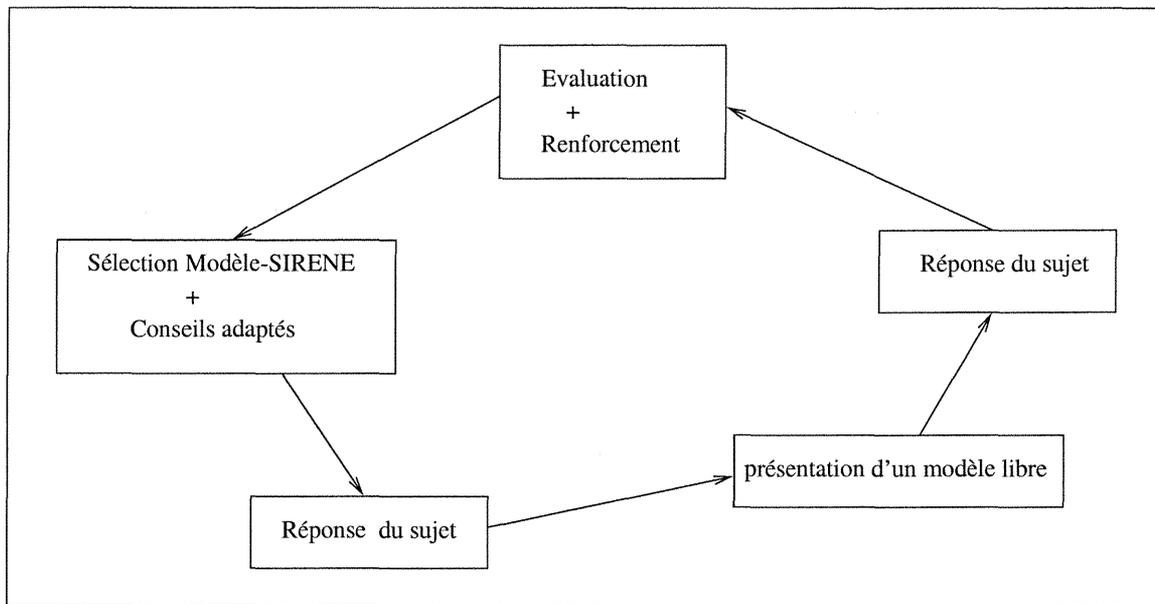


FIG. 7.8 – Schéma de fonctionnement de présentation des conseils et des renforcements

ne reçoit plus de conseils, d'où les $i - 1$ conseils ou recommandations à considérer. Ce dernier point fait également écho à la notion d'étayage dans laquelle plus le niveau de l'élève est bas, plus il faut l'aider. Ici, plus la réponse de l'élève est proche de la catégorie cible, plus les conseils se réduisent et disparaissent même lorsque la cible est atteinte.

Toutefois, les conseils ne sont pas individualisés ; tous les sujets présentant un même niveau de performance reçoivent le(s) même(s) conseil(s). Nous estimons que ce qu'il faut adapter à l'utilisateur concerne le type de conseil en fonction de la réponse fournie et non le conseil en fonction de l'utilisateur même s'il est possible d'envisager un couplage de différents médias qui permettraient par exemple de choisir une présentation des interactions et des conseils sous forme écrite, de langage des signes ... D'ailleurs, si l'on revient aux travaux de Rondal et à la notion d'étayage (voire page 19), on note que ce que l'on adapte à l'utilisateur, c'est la quantité et la complexité ou la qualité des conseils qui lui sont fournis. Ceux-ci sont déterminés par le niveau de l'utilisateur et non par l'utilisateur lui-même. Cependant, nous ne pensons pas être en contradiction avec l'idée d'adaptation de l'interaction à l'utilisateur même si celui-ci n'en est pas directement à l'origine dans la mesure où nous faisons reposer l'adaptation (il y a effectivement adaptation de l'interaction) sur les compétences de chaque utilisateur du système. Dans ce cadre, chaque conseil est stocké dans le module de l'expert avec l'ensemble flou auquel il est associé.

Que la cible soit atteinte ou non, cela n'a aucun impact sur les conseils. Leur objectif est d'aider à la réalisation du comportement souhaité, de préparer et de faciliter sa mise en œuvre. Ainsi, même si le résultat mesuré par l'évaluation de la réponse n'est pas atteint, la cause n'est pas à rejeter sur les conseils. Ceux-ci sont conçus dans l'optique d'aider à l'émission de la réponse mais ne la conditionne toutefois pas. Il n'y a donc pas lieu d'instaurer une boucle rétroactive entre la réponse et les conseils. L'adaptation des conseils se limite donc à une sélection de ceux-ci en fonction de la performance estimée lors de la dernière réponse.

Après la réponse de l'élève, une seconde étape se met en place : les renforcements. Ils résultent du processus d'évaluation initiale décrit dans la section 6.1. Lorsque les deux dernières sont qualitativement différentes, le système détermine laquelle est supérieure à l'autre. Le renforcement est positif si la der-

nière réponse est supérieure, c'est-à-dire plus proche de la cible, à la réponse antérieure et négatif dans le cas contraire. Lorsque les réponses sont identiques, aucun renforcement n'est proposé. Le choix que nous avons fait est de dichotomiser les renforcements afin de maximiser leurs effets. En effet, pour que le renforcement soit effectif, il faut qu'il soit très proche du comportement renforcé [Skinner]. Nous avons donc choisi d'agir toujours sur la dernière réponse du sujet, et donc d'utiliser des renforcements positifs et négatifs. Dans GEREV, les renforcements délivrés à la suite de l'évaluation des paramètres primaires sont de la forme "c'est mieux que précédemment, continuez !!". Ils fournissent ainsi une évaluation qualitative au sujet des deux dernières solutions sans prendre toutefois en compte directement la référence experte.

7.2.2 Et l'adaptation à l'utilisateur ?

Nous nous proposons ici de reprendre ces différents points sous l'éclairage direct de l'individualisation de l'interaction. Concrètement, nous tentons de justifier la construction de nos propositions précédentes en répondant à la question : "quels sont les points qui permettent au système de prétendre au qualificatif de tuteur interactif?".

Pour illustrer ce en quoi consiste l'adaptation à l'utilisateur, nous proposons de suivre le mécanisme qui conduit de l'entrée de la réponse du sujet à la rétroaction fournie par le système.

Nous sommes à un instant donné dans un exercice ; le sujet vient de réaliser un "Modèle-SIRENE". SIRENE fournit généralement un "taux de recouvrement" de la réponse par rapport au modèle. GEREV demande au sujet de réaliser un modèle libre. Cette production est catégorisée dans le domaine de référence, puis comparée à la réponse précédente de même nature.

Cette comparaison donne lieu à une rétroaction qui est totalement dépendante du sujet. Elle lui propose un moyen d'évaluation externe d'une réponse qui prend comme référence la réponse précédente ainsi que la connaissance experte. Ainsi, ce premier retour est adapté au sujet et à ses possibilités puisqu'il se fonde sur ces dernières.

Ce mécanisme est mis en œuvre pour toutes les productions proposées au cours d'un même exercice dans une même session. Il est général et totalement adapté à son utilisateur. Il est appliqué sur toutes les aptitudes manipulées pour toutes les réponses consécutives dans des situations sans modèle. Cette rétroaction repose sur un message de la forme "c'est mieux que précédemment", "c'est identique" ou "c'est moins bien".

La seconde rétroaction adaptée à l'utilisateur consiste en un choix de la prochaine tâche à réaliser et ceci, en fonction de l'état des connaissances du sujet lors de la session actuelle. Cette tâche peut être de trois types différents qui sont une tâche de même nature que celle qui vient d'être proposée au sujet (même exercice, autre instance), une tâche liée indirectement à l'exercice en cours et une dernière tâche se rattachant à un autre exercice.

Dans le premier cas, le système choisit une instance de l'exercice en cours. Le choix résulte de la nécessité d'attirer l'attention du sujet sur la ou les limitation(s) de la réponse proposée. Chaque instance est typée en fonction de son rattachement à un ensemble du domaine de connaissances. Le choix est réalisé à partir de l'évaluation et de la catégorisation de la dernière réponse du sujet et non d'une progression pédagogique établie *a priori*. Il y a donc une adaptation de la rétroaction et ceci en prenant pour point de départ les possibilités du sujet.

Dans le second cas, le système a détecté une détérioration de la performance pour les paramètres intervenant indirectement dans la production de la réponse (au niveau des paramètres secondaires). Cette détérioration s'est déjà produite plusieurs fois de suite (n fois) et atteint le seuil n paramétrable. Le système dirige alors le sujet vers un retour ponctuel et décontextualisé à la rééducation de ce paramètre

sans pour autant interrompre la tâche en cours qui est la rééducation du paramètre primaire. La réalisation de cette "déviation ponctuelle" vers un paramètre travaillé antérieurement se poursuit jusqu'à ce que le niveau de performance du paramètre secondaire équivaut à celui obtenu lorsqu'il était primaire. Cette déviation n'est pas réursive au sens où elle ne peut conduire elle-même à une nouvelle déviation. Ce mécanisme permet une réelle adaptation aux compétences de l'utilisateur. En faisant des retours arrières sur des aptitudes dont les performances obtenues se dégradent par rapport à une catégorisation antérieure, le système s'adapte à l'état de connaissances actuel du sujet tout en tenant compte des connaissances antérieures. Signalons avant de poursuivre que l'état des paramètres secondaires est mis à jour également lorsqu'une amélioration de performance est observée. Toutefois, seule une performance inférieure à celle obtenue lorsque le paramètre est primaire donne lieu à une remédiation active et visible par le sujet. Quant au dernier cas relatif à la présentation d'un autre exercice, il résulte de la satisfaction des conditions d'arrêt qui sont l'absence de progrès durant un seuil paramétrable (nous avons choisi dans GEREV un seuil de trois productions successives) ou l'atteinte de la cible plusieurs fois (supérieur au même seuil que précédemment).

Chapitre 8

Implantation informatique de GEREV

Jusqu'à présent, nous avons exposé des concepts, des principes mis en œuvre dans un système informatique afin d'optimiser l'autonomisation du système dans le guidage adapté de son utilisateur. Dans ce chapitre, nous nous penchons sur la réalisation concrète de GEREV, un système informatique visant l'application des propositions déclinées précédemment.

8.1 Les choix effectués

Dans la mesure où SIRENE est implanté sur PC sous Windows, le choix de la machine et du système d'exploitation ne se pose pas ; en effet, GEREV étant complémentaire à SIRENE, il adopte le même environnement.

Au niveau du langage retenu, nous voulions un langage objet afin de maximiser la modularité du système, sa réutilisabilité et de bénéficier des propriétés d'héritage des différentes classes. Nous nous sommes tournés vers deux éventualités qui sont le C^{++} utilisé dans SIRENE et le Java. Nous avons opté finalement pour Java en raison de sa capacité à être utilisable sur le Web et sur des environnements différents grâce à son interpréteur qui permet de rendre les programmes transportables et utilisables à distance.

GEREV est destiné à deux populations d'utilisateurs :

- les élèves qui vont rééduquer leur voix ;
- les experts qui vont contrôler l'utilisation du système. Ceux sont eux qui vont entrer des données sur les sujets (état civil, description de l'appareillage du sujet, du type de surdité . . .), consulter les résultats obtenus et dans le cadre d'un mode de fonctionnement semi-dirigé proposer les exercices à réaliser.

GEREV est, pour répondre aux besoins de ces populations, constitué de deux applications qui sont EXPERT2.jpr et EXPERT.jpr. Ces dernières sont déclinées dans la suite de ce chapitre et en constituent l'essence même.

8.2 Deux applications : leur fonctionnalité

8.2.1 Une application pour l'expert, Expert2.jpr

Cette application est dédiée à l'expert-orthophoniste. Elle se présente graphiquement sous la forme d'une interface qui permet d'une part la création, la consultation et la modification des profils des utilisateurs et d'autre part, l'obtention d'informations pratiques sur le fonctionnement de GEREV et

SIRENE, en plus des fonctionnalités classiques de toutes applications telles que les sauvegardes, les copier/coller... Le *look and feel* que nous avons retenu est de type windows. Ce choix résulte d'une volonté de minimiser le temps d'adaptation des utilisateurs au système ainsi que d'homogénéiser l'interface de SIRENE et de GEREV. Par conséquent, le lancement de cette application amène le spécialiste sur une interface "classique" composée d'une barre d'état, qui rappelle que cette partie du système est dédiée au spécialiste, et d'une barre des menus. Cette dernière offre cinq rubriques qui ont pour intitulé "Dossier", "Édition", "Informations", "Exercices", "Aide".

La rubrique "Dossier"

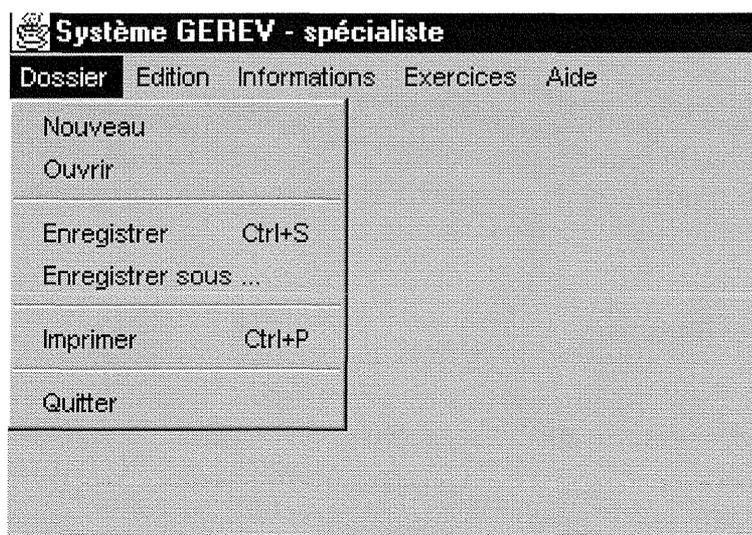


FIG. 8.1 – Rubrique "Dossier" de l'application dédiée à l'expert

Cette rubrique, illustrée sur la figure 8.1, a pour objectif de permettre la création, la modification et la consultation du profil des patients. Les fonctions disponibles sont "Nouveau" pour la création d'un profil-patient, "Ouvrir" Pour la consultation et la modification d'un profil, "Enregistrer" et "Enregistrer sous" pour l'enregistrement des données, "Imprimer" et "Quitter".

La sélection de la fonction "Nouveau" permet l'accès à une description des données d'un patient. Les données à recueillir ou constituant le futur profil sont répertoriées à l'intérieur de différentes fenêtres auxquelles on accède par des boutons. Ces derniers sont des liens sur des fichiers qui permettent d'accéder directement à l'information désirée. Ces boutons recouvrent des parties thématiques qui sont l'état civil, un état des paramètres intervenant dans la qualité et l'intelligibilité de la parole (un module sur l'état de la voix, un module sur l'état de l'articulation, un module sur l'état de la prosodie), les modes de fonctionnement de GEREV, et finalement, les aides disponibles préférentiellement pour le patient. Ce type de présentation permet au spécialiste, par thème d'information, d'avoir une vision globale des données dont le système dispose sans avoir à manipuler par exemple un ascenseur, à changer de fenêtre pour modifier des données, à limiter le nombre des messages de demande de confirmation de la modification des fichiers (l'enregistrement se fait lorsque le spécialiste quitte le système ou change de patient)...

L'état civil dont une vue est proposée sur la figure 8.2 se constitue des informations minimales pour le fonctionnement de GEREV, pour l'instanciation d'un modèle de l'élève. La création d'un profil est

Système GEREV - spécialiste
Dossier Edition Informations Exercices Aide

Sansnom

Etat civil

Voix

Articulation

Prosodie

Modes

Aides

Nom Prénom Age

femme homme

Déficit : léger moyen profond

Autres et précisions :

Appareillage non oui

Gauche
 Droite
 Les deux

FIG. 8.2 – Constitution de l'état civil pour un profil utilisateur

conditionnée par une identité du patient. Cette identité peut être plus ou moins complète dans la mesure où elle peut soit se limiter au nom, prénom et sexe du patient, soit intégrer davantage d'informations comme son âge, le degré du déficit, l'appareillage et d'autres informations ou précisions laissées à la liberté du spécialiste. L'information sur le sexe du patient fait partie des informations indispensables puisque celle-ci influe sur certains paramètres comme la hauteur de la voix.

Le module sur la voix. Nous ne commentons que le module sur la voix dans la mesure où la structure et le type de données sont identiques pour les deux autres modules (Articulation et prosodie).

Dans ces modules, tous les paramètres sont présentés de manière qualitative et quantitative. L'estimation qualitative est fournie soit par GEREV soit par le spécialiste. Elle contient, pour chaque paramètre, les différentes catégories floues constituant la connaissance de référence du paramètre. L'estimation quantitative correspond au calcul de la moyenne théorique du paramètre. Elle est fournie uniquement par le système.

Outre ces deux types de données, le spécialiste dispose de la possibilité, par l'intermédiaire de la sélection de la caractéristique "satisfaisant", de contraindre le système à accepter le niveau du sujet pour un paramètre et ceci, quel que soit l'état de ce paramètre. Par conséquent, dans le guidage du patient, le système considère que le paramètre ainsi marqué n'est pas à rééduquer lors de la session d'apprentissage.

Les modes permettent de sélectionner parmi trois modes de fonctionnement ("dirigé", "semi-dirigé", "libre") celui qui présente le plus d'intérêt pour le patient à un moment donné. Dans le cas de la sélection du mode semi-dirigé, le spécialiste-orthophoniste doit préciser les exercices qui font l'objet de la prochaine session d'apprentissage.

Les aides permettent quant à elles de retenir, pour chaque exercice, la représentation graphique et les aides que le système doit fournir préférentiellement au patient. Pour certains exercices, la forme graphique peut varier tout en conservant un même objectif pédagogique et une même mesure du paramètre.

Pour l'exercice portant sur l'articulation isolée des voyelles, le spécialiste dispose, par exemple, de deux formes de visualisation :

- l'une a recours à une coupe du tractus vocal. Celui-ci présente la configuration des articulateurs pour une voyelle cible. Elle donne une information de type essentiellement kinesthésique ;
- l'autre utilise une représentation plus abstraite dans laquelle elle fournit une information de "distance" par rapport à la voyelle cible. Elle utilise en fait une représentation qui situe la production du sujet au travers d'un symbolisme de couleur dans lequel un rectangle vert sur la voyelle cible traduit l'atteinte de celle-ci durant un laps de temps minimal. Un rectangle d'une autre couleur ou centrée sur une autre voyelle traduit un écart par rapport à la cible ou une production de la voyelle trop courte temporellement pour être catégorisée en cible atteinte.

Les deux dernières fonctions (modes et aides) ne sont actuellement pas implantées. Elles ont néanmoins fait l'objet d'une réflexion et d'un travail prévisionnel qui vont permettre, dans un avenir proche, une réalisation technique et concrète dans GEREV.

La sélection de la fonction "Ouvrir" donne également accès aux données constituant le profil patient. Chaque modification des données d'un profil existant ou création d'un profil doit être enregistrée dans un fichier. Celui-ci est constitué généralement du nom du patient et de l'extension ".gev". Cette extension qualifie tous les fichiers patients, les profils dans GEREV.

Lors de la création d'un profil-patient, à son instanciation, un fichier "historique" (nom du patient suivi de l'extension ".htr") est créé. L'expert est informé de sa création et de son emplacement dans l'arborescence comme cela est illustré sur la figure 8.4. Cet historique est un fichier qui répertorie, session

Système GEREV - spécialiste

Dossier Edition Informations Exercices Aide

Sansnom

Etat civil

Voix

Articulation

Prosodie

Modes

Aides

MODULE SUR LA VOIX :

Fréquence fondamentale : stable instable très instable
 satisfaisant

Hauteur du fondamental : trop basse basse bonne haute trop haute
 satisfaisant Estimation quantitative :

Variation de hauteur : contrôlée presque peu contrôlée
 satisfaisant Estimation quantitative :

Intensité : trop faible faible bonne forte trop forte
 satisfaisant Estimation quantitative :

Voisement : aisé difficile très difficile
 satisfaisant Estimation quantitative :

Souffle : bien court trop court
 satisfaisant Estimation quantitative :

FIG. 8.3 – Fenêtre de présentation du niveau des paramètres de la voix

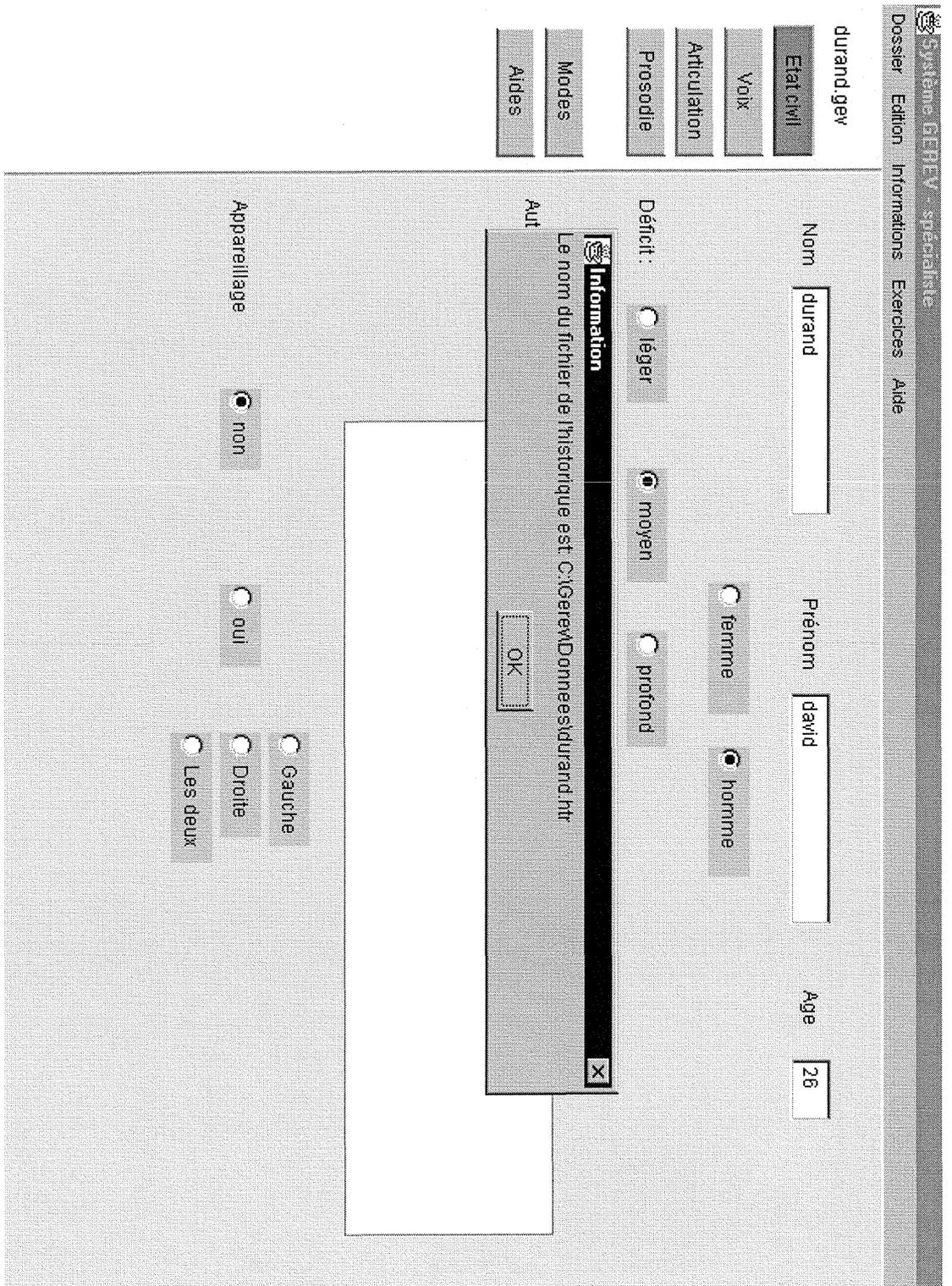


FIG. 8.4 – Création d'un historique lors l'initialisation du profil

par session, les réponses du sujet. Il a une fonction informative et ne constitue pas une source d'informations pour le système informatique.

La rubrique "Édition"

Cette rubrique ne contient pas de fonctionnalités spécifiques à GEREV. Elle a pour objectif de permettre au spécialiste de manipuler des données en utilisant des commandes comme Coller, Copier ...

La rubrique "Informations"

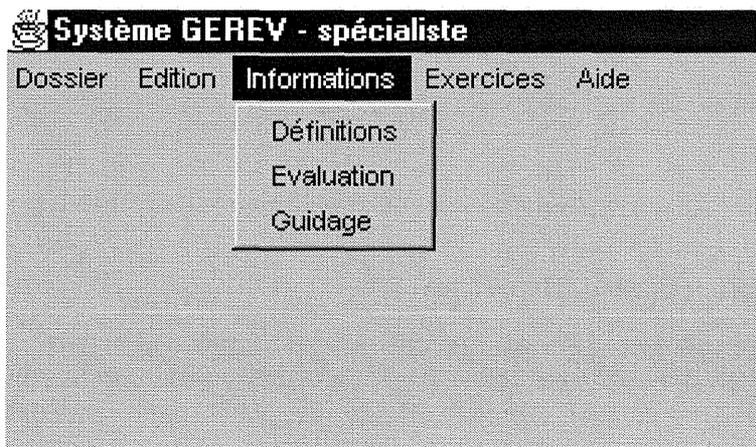


FIG. 8.5 – Menu d'information du fonctionnement et de l'utilisation de GEREV

Comme son intitulé le laisse supposer, cette rubrique permet un accès direct, pour le spécialiste, à de l'information sur la manière de fonctionner de GEREV. L'information porte sur les trois domaines présentés sur la figure 8.5 qui sont les "Définitions", "l'évaluation" et le "Guidage".

Les définitions fournissent des précisions et des définitions claires sur les notions utilisées dans GEREV. Elles permettent au spécialiste de savoir ce que recouvrent les termes manipulés et de savoir précisément ce qu'est, par exemple, un paramètre dans ce système.

Quant aux deux domaines suivants, ils portent à la fois sur une explication et une justification des mécanismes en œuvre dans le système et sur les différentes fonctionnalités offertes. L'information apportée permet ainsi de répondre aux questions du type "Qu'est-ce qu'une moyenne théorique? Comment est-elle calculée? Qu'est-ce qu'entraîne la sélection de la fonctionnalité "satisfaisant"? ..."

La rubrique "Exercices"

Cette rubrique, illustrée sur la figure 8.6, permet au spécialiste de visualiser les exercices sans devoir jongler avec SIRENE et GEREV. Le spécialiste a ainsi la possibilité d'accéder spécifiquement à un module particulier (celui sur la voix, sur l'articulation, sur la prosodie) ou à l'intégralité des exercices. L'utilisation de ces fonctions permet une manipulation et des essais répétitifs sans prise en compte de ces données recueillies ou de nécessité de création d'un profil particulier.

La rubrique "Aide"

Cette rubrique pointe sur la fonction "A propos" que l'on retrouve dans toutes les applications dotées d'une interface.

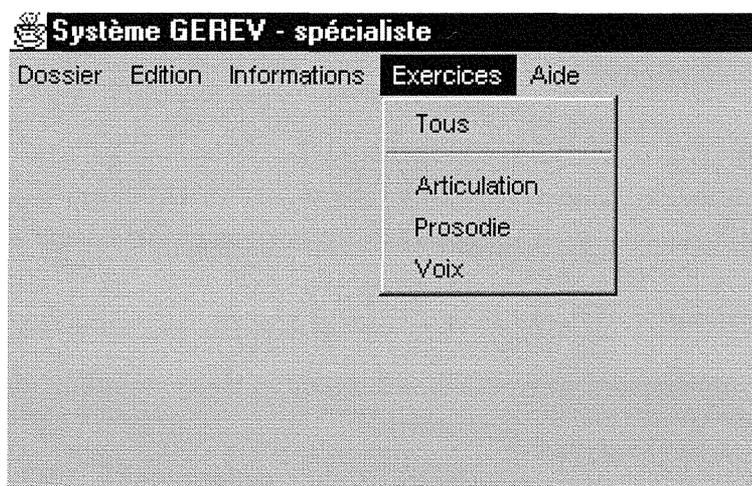


FIG. 8.6 – Menu de visualisation des exercices de SIRENE

8.2.2 Une application patient, Expert.jpr

Cette application est dédiée à l'élève. Elle diffère par la forme de l'application dédiée à l'expert dans la mesure où elle est transparente pour l'élève. Ce dernier utilise SIRENE, dispose de l'interface graphique de SIRENE. L'intervention visible de GEREV pour l'élève est discrète ; elle se fait au travers de fenêtres informatives, de sélection de tâches, de renforcement ...

Un certain nombre de ces fenêtres informatives que nous présentons dans la suite de cette section n'ont d'ailleurs qu'une fonction illustrative du fonctionnement de cette application. Elles disparaîtront dans une version plus élaborée du système.

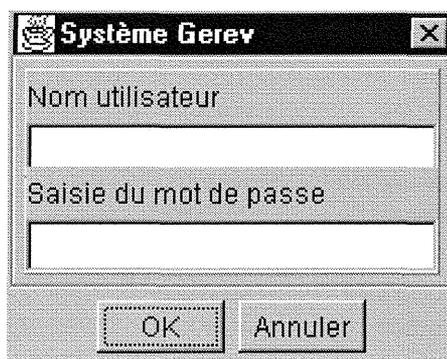


FIG. 8.7 – Fenêtre de saisie de l'identité du patient et de son mot de passe

Notons cependant que malgré l'apparente distinction des deux applications, de nombreux et indispensables liens existent entre celles-ci. De manière très schématique, l'application dédiée au spécialiste peut se réduire à un système d'élaboration de profils-utilisateurs, alors que l'application patient relève de la mise en œuvre de traitements reposant sur les modèles de référence et pédagogiques. Ainsi, l'application patient va "calculer", à partir des données issues de l'application spécialiste, l'état et le niveau de performance du patient, choisir les tâches, choisir les conseils et modifier en retour les connaissances dont le système dispose sur le patient.

Le lancement et l'utilisation de cette application ne sont effectifs qu'après l'entrée de l'identité et du mot de passe de l'utilisateur et de leur vérification. On accède à cette application que dans le cas où un profil utilisateur est instancié dans l'application dédiée au spécialiste. La fenêtre permettant la saisie de l'identité et du mot de passe du patient est présentée sur la figure 8.7.

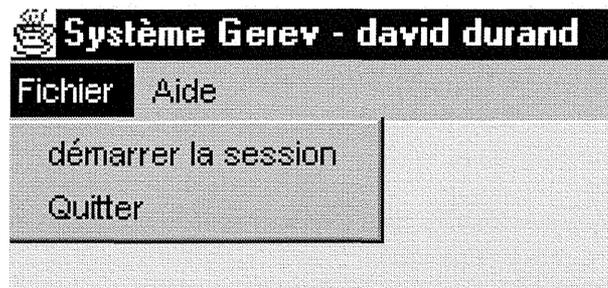


FIG. 8.8 – Menu d'ouverture d'une session

Après la réussite à cette première étape, le système ouvre le fichier du patient et présente un écran d'accueil qui permet de démarrer la session d'apprentissage en tant que telle à l'aide d'un menu illustré sur la figure 8.8. Cet écran d'accueil est spécifique à GEREV. Il présente une bannière qui rappelle l'application en cours et l'identité du patient.

Le fonctionnement de SIRENE est simulé. Nous entrons manuellement les valeurs des paramètres. Dans la version finale de GEREV, le système devrait recueillir ces données à la sortie des modules de traitement de la parole intégrés dans SIRENE. Tout comme dans l'application précédente, nous faisons apparaître des fenêtres informatives de l'activité de GEREV qui ont pour unique objectif de visualiser, à ce niveau d'élaboration du système, les étapes et principes pédagogiques mis en œuvre et de vérifier que le système fournit bien les résultats attendus.

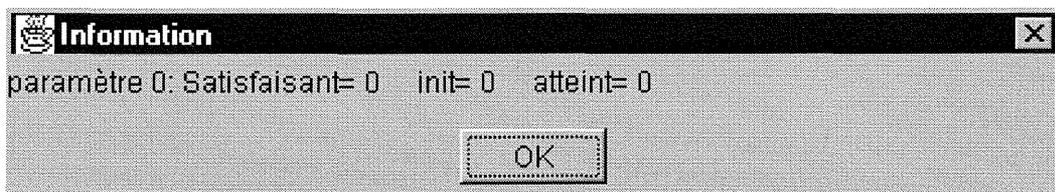


FIG. 8.9 – Simulation du contrôle de l'état des paramètres

L'activité de GEREV après l'ouverture d'une session d'apprentissage débute par un passage en revue de l'état de tous les paramètres manipulés. Nous présentons sur la figure 8.9 les informations, les données consultées et prises en compte pour un paramètre (le même type de traitement est réalisé pour chaque paramètre). Ces données sont :

1. la dénomination du paramètre. Nous avons numéroté tous les paramètres. Le paramètre 0 correspond à l'intensité ;
2. le critère de satisfaction. Il peut prendre deux états : un état sélectionné (la valeur du critère = 1) qui correspond au fait que pour la session en cours, ce paramètre ne doit pas faire partie des paramètres réduqués quel que soit le niveau de ce paramètre et, un état non sélectionné (valeur

- du critère = 0) qui correspond au fait que le paramètre est à traiter et doit faire l'objet si nécessaire d'une rééducation ;
3. l'initialisation de la catégorie du paramètre. Celle-ci correspond à une estimation qualitative du paramètre. L'état d'initialisation nul traduit une absence de catégorisation du paramètre. Un état non nul traduit l'appartenance à une catégorie floue définissant l'état du paramètre ;
 4. le critère de réussite "absolue" traduit l'idée que la réponse de l'élève coïncide ou non à la cible que le sujet devrait idéalement atteindre. Dans l'exemple du paramètre intensité, ce critère est égal à 1 si la performance du sujet est catégorisée en "intensité bonne" avec un degré d'appartenance, au niveau de la moyenne théorique, de 1.

Après cette prise en compte des données pour tous les paramètres, GEREV sélectionne un type d'exercice à l'aide du graphe des tâches et une instance de ce type d'exercice. L'instance de l'exercice (une tâche ou un exercice particulier) peut prendre deux formes :

- un exercice contraint que l'on appelle "avec modèle" qui présente un modèle avec certaines caractéristiques que l'élève doit suivre pas à pas. L'objectif de cette forme est soit de mettre en évidence les lacunes du sujet, soit de l'entraîner à atteindre progressivement une cible ;
- un exercice libre que l'on appelle "sans modèle" dans lequel la tâche du sujet est de produire, par exemple pour le paramètre intensité, une réponse "naturelle", c'est-à-dire ni trop forte ni trop faible.

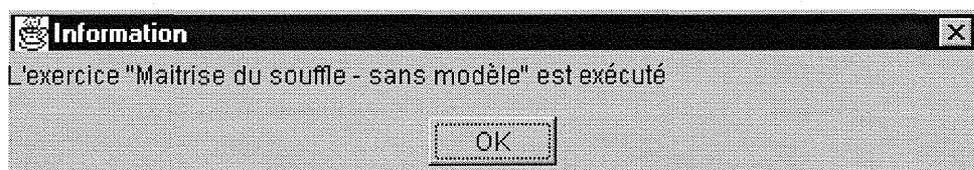


FIG. 8.10 – *Choix de l'exercice sans modèle*

Ces deux formes s'alternent systématiquement. L'évaluation et le guidage sont calculées, proposées à partir des sans modèles. Un exemple d'exercice "sans-modèle" est présenté sur la figure 8.10. Les exercices avec modèles ne donnent pas lieu à une évaluation autre que celle proposée dans SIRENE, c'est-à-dire visuelle ou de type taux de recouvrement par exemple. Ils ne constituent pas, à notre sens, une source d'informations suffisamment pertinente pour l'élaboration d'un guidage. En effet, avec cette forme d'exercice, on ne peut mesurer la compétence d'un sujet à un paramètre ; on ne peut qu'évaluer la réussite par rapport au modèle sélectionné. Si l'on demande à l'élève de souffler et pas longtemps, on peut estimer la réussite à la consigne "souffler fort et pas longtemps" mais nous ne pourrions rien conclure, déduire sur les compétences et la maîtrise des paramètres de durée et d'intensité du sujet.

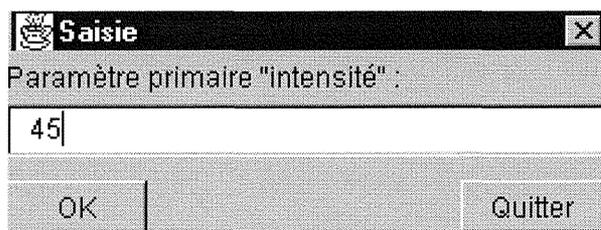


FIG. 8.11 – *Simulation de la production d'une réponse par paramètre*

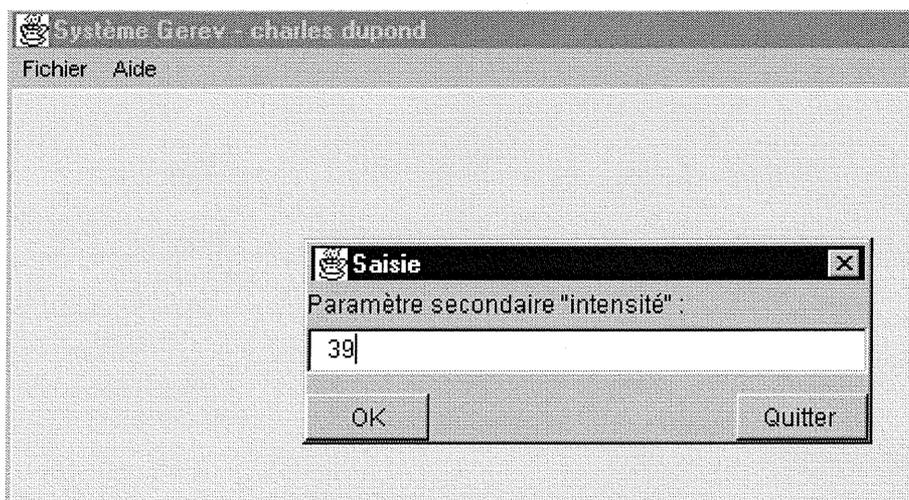


FIG. 8.12 – Prise en compte des paramètres secondaires

L'évaluation réalisée sur l'exercice sans modèle contraint le choix de l'exercice avec modèle.

Avant toutefois d'évaluer la réponse de l'élève, il faut que celle-ci soit émise. Une simulation est proposée au travers d'une fenêtre de saisie de données. Ces dernières peuvent être relatives à un statut de paramètre primaire (comme sur la figure 8.11) ou relatives à un statut de paramètre secondaire (comme sur la figure 8.12).

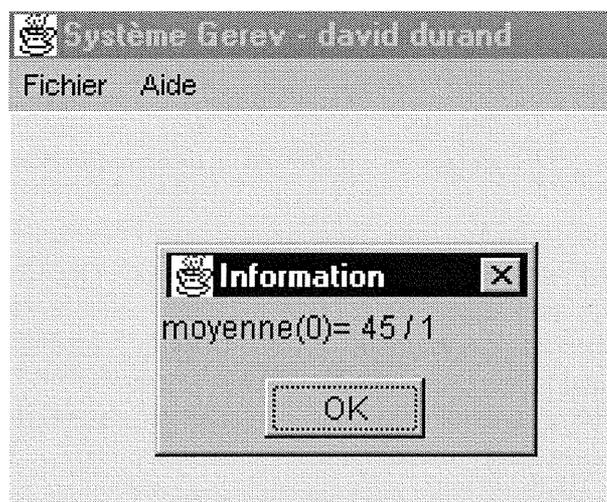


FIG. 8.13 – Calcul de la moyenne théorique d'un paramètre

Une réponse est systématiquement suivie d'un traitement immédiat. Celui-ci correspond à un calcul de la moyenne théorique (pour un rappel de la formule, consulter la page 133). Une illustration de ce traitement est proposée sur la figure 8.13. Cette moyenne est pondérée par un coefficient qui permet de prendre en compte la récence de la réponse du sujet.

Lorsque dans une même session d'apprentissage plusieurs évaluations ont été réalisées sur un paramètre primaire, GEREV compare les réponses successives. Il propose, dans un premier temps, une catégorisation des réponses au travers de vecteurs. Un exemple de présentation de vecteurs illustre ce point

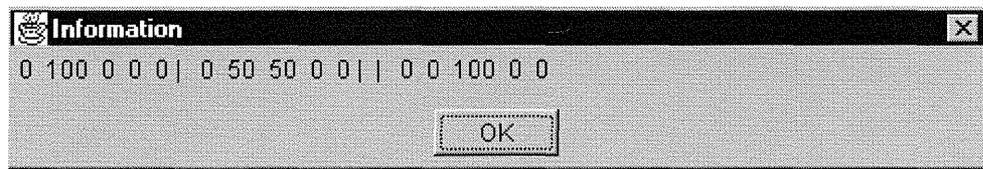


FIG. 8.14 – Catégorisation de la production du sujet sous forme de vecteur

sur la figure 8.14. Les vecteurs ont toujours la même structure : chaque point correspond à un degré d'appartenance à une catégorie. Il y a autant de points dans le vecteur que de catégories. Le système fournit quatre vecteur au maximum : les trois dernières productions de l'élève si elles ont lieu d'être et le vecteur de la connaissance de référence experte.

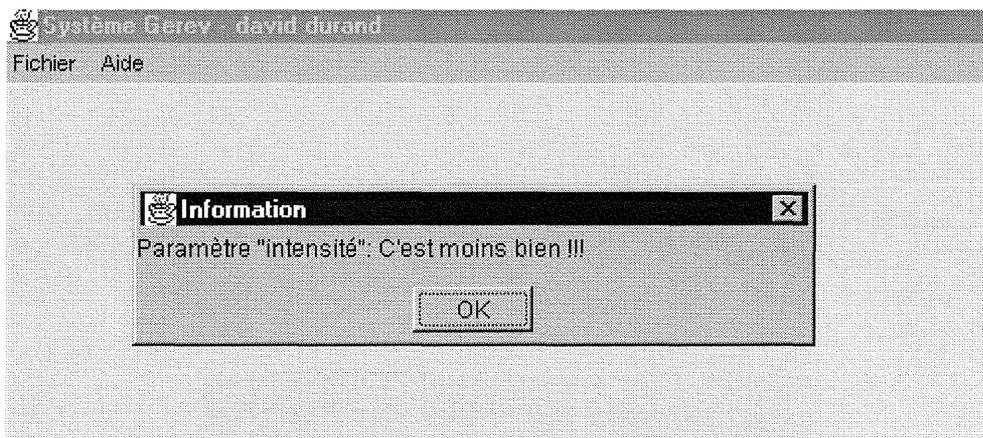


FIG. 8.15 – Renforcement des réponses des utilisateurs

La fenêtre suivante fournie, dans le cas de réponses successives pour un même type d'exercice, une évaluation qui correspond à l'interrogation "Y a-t-il une amélioration entre les deux dernières réponses du sujet?" Sur la figure 8.15, qui s'appuie sur les réponses représentées sous la forme de vecteurs sur la figure 8.14, la réponse est négative. En effet, la distance entre la première réponse et la cible est qualitativement plus faible que celle mesurée pour la réponse la plus récente.

L'évaluation d'un paramètre se termine par une estimation de la possibilité de progrès ou par l'atteinte de la cible dans la session d'apprentissage en cours. En fait, GEREV vérifie la satisfaction de deux contraintes (pas de progrès qualitatif entre les trois dernières productions ou une moyenne théorique équivalente à la catégorie cible). Si ces dernières sont satisfaites, le paramètre prend l'état "établi". Une illustration de cette condition est proposée sur la figure 8.16. Cet état conduit GEREV à proposer un autre type d'exercice.

8.3 Quand est-il de l'aspect technique?

8.3.1 Le fonctionnement général

Dans les deux sections précédentes, nous avons exposé les choix réalisés au niveau du langage utilisé, de l'environnement dans un premier temps et les fonctionnalités, l'apparence du système ensuite.



FIG. 8.16 – Établissement d'un paramètre

Nous nous penchons maintenant plus spécifiquement sur les choix programmatifs et l'architecture logicielle de GEREV. Notre système est destiné à permettre à un sujet d'utiliser de manière plus ou moins autonome un système de visualisation de ses productions vocales. Dans cette optique, ce système doit modéliser son utilisateur. Cette modélisation présente deux destinataires :

- l'expert ou le spécialiste-orthophoniste ;
- le système.

Ces deux partenaires ont des besoins et des fonctions différents. Nous avons ainsi conçu GEREV comme un logiciel comportant deux applications distinctes. Toutefois, ces applications ne sont pas indépendantes. Elles doivent échanger des données. L'expert doit disposer d'informations sur l'évolution des compétences du patient et le système doit se servir de la modélisation antérieure du patient pour sélectionner le guidage adapté à son utilisateur. Cet échange entre les deux applications se fait par l'intermédiaire de fichiers. Signalons néanmoins que, pour des raisons de vitesse de traitements, les fichiers ne sont "lus et écrits" que lors du début de la session d'apprentissage.

A un patient correspond deux fichiers :

- l'un comportant des données relatives au patient lui-même ; c'est-à-dire le profil du patient et les données relatives aux différentes sessions ;
- l'autre comportant la totalité des productions du patient ; c'est-à-dire l'historique.

Dans ces deux fichiers, nous avons évoqué trois types de données nécessaires au fonctionnement du système. Le premier type présenté est le profil du patient. Celui-ci est constitué de l'ensemble des valeurs obtenues pour chaque paramètre manipulé. Ces valeurs sont les moyennes pondérées de toutes les productions du patient. A chaque paramètre est associée une valeur pour le paramètre primaire et pour le paramètre secondaire.

Le second type porte sur les données relatives aux différentes sessions ; pour chaque session, le système a besoin de savoir si les paramètres ont atteint leur niveau cible. Pour ce faire, nous avons utilisé un booléen caractérisant l'aspect atteint ou non. Cet aspect peut varier d'une session à une autre mais aussi à l'intérieur d'une session. Le système a également besoin de disposer d'un booléen qui indique la nécessité de rééduquer ou non un paramètre lors de la session. Cette nécessité est rendue par le caractère satisfaisant attribué à chaque paramètre. Finalement, pour spécifier une valeur initiale au paramètre proposé par l'expert, une variable de type entier détermine soit l'absence d'initialisation de l'estimation qualitative par l'expert (valeur=0), soit la catégorie déterminée (valeur=le numéro de la catégorie retenue).

Le dernier type concerne une production qui est définie par un ensemble de valeurs des paramètres avec un statut primaire ou secondaire. Lors de l'initialisation des paramètres, les valeurs sont fixées à 0. Ensuite, les valeurs sont modifiées lors de la réalisation d'un exercice mettant en œuvre spécifiquement des paramètres avec un statut primaire et/ou secondaire.

Après cette première approche générale de GEREV, nous envisageons deux types de classes qui ne sont pas spécifiques à une application de GEREV : celles portant sur l'interface puis celles portant sur la gestion des fichiers (le nom des classes est, dans la suite, toujours mis en gras).

Les classes relatives à l'interface

GEREV utilise plusieurs classes dédiées uniquement à l'interface. Elles permettent la gestion de l'affichage des fenêtres. Ces classes sont :

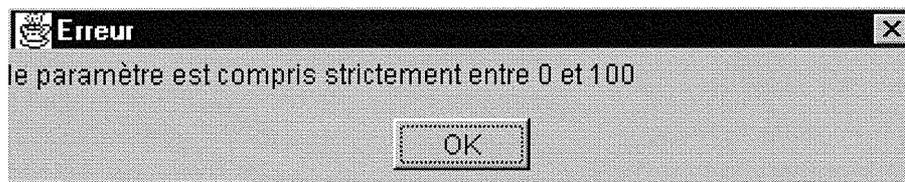


FIG. 8.17 – Exemple de fenêtre contenant un message d'erreur

- la classe **Fenêtre** : cette classe permet de générer des fenêtres contenant soit un message d'information (une de ces fenêtres est présentée sur la figure 8.10), soit un message d'erreur (présentée sur la figure 8.17)
- la classe **FenetreOuiNon** : elle permet de générer une fenêtre qui demande la confirmation (oui ou non) à un message ;
- la classe **FenetreSaisie** : elle permet de générer une fenêtre qui autorise la saisie d'informations (une chaîne de caractère). Un exemple de fenêtre de saisie est proposé sur la figure 8.11 ou 8.12 ;

Les classes relatives à la gestion des fichiers

En ce qui concerne le fichier "historique" que nous avons évoqué en introduction de cette section, il existe deux classes : **EcrireFicHisto** et **LireFicHisto**. Elles sont utilisées respectivement à l'écriture et à la lecture de l'historique. Le nombre de productions est indiqué au début de chaque fichier. Les noms de ces fichiers ont une extension ".htr". Deux classes sont également dédiées au fichier "profil" : **FichierEcrire** et **FichierLire**. Ces fichiers ont pour extension ".gev" ; ils comportent le profil du patient ainsi que les données relatives aux différentes sessions.

8.3.2 L'application "Expert"

Les classes de cette application sont regroupées dans le projet "expert2.jpr". Un schéma des dépendances entre classes est proposé sur la figure 8.18.

La classe principale est **Application1**. Elle ne comporte que la fonction principale "main". Cette classe ne sert qu'à initialiser une instance de **Frame1**.

La classe **Frame1** contient tout ce qui est relatif à l'interface et à la gestion des événements de cette dernière. Elle comporte, outre les différentes fenêtres, menus, boutons, une instance de **Dossier** qui correspond aux données du patient en cours de lecture, modification ou création.

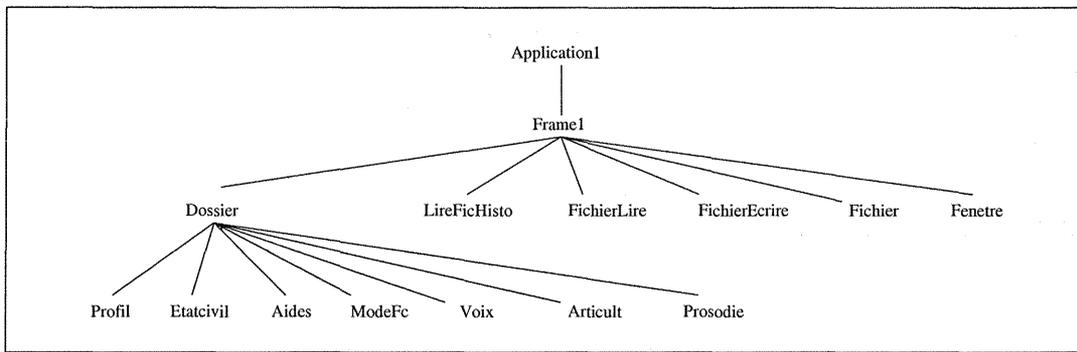


FIG. 8.18 – Les dépendances entre les classes pour l'application "Expert"

La classe **Dossier** gère l'interface des données d'un patient ainsi que l'appel aux instances des différentes classes suivantes : **EtatCivil**, **Articult**, **Prosodie**, **ModeFct**, **Aides** et **Voix**.

La classe **Dossier** est composée de deux sous-fenêtres ; la première contient un ensemble de boutons qui permettent d'accéder aux données de l'état civil, des paramètres de la voix ... et la seconde contient le contenu du type de données choisi.

8.3.3 L'application "Patient"

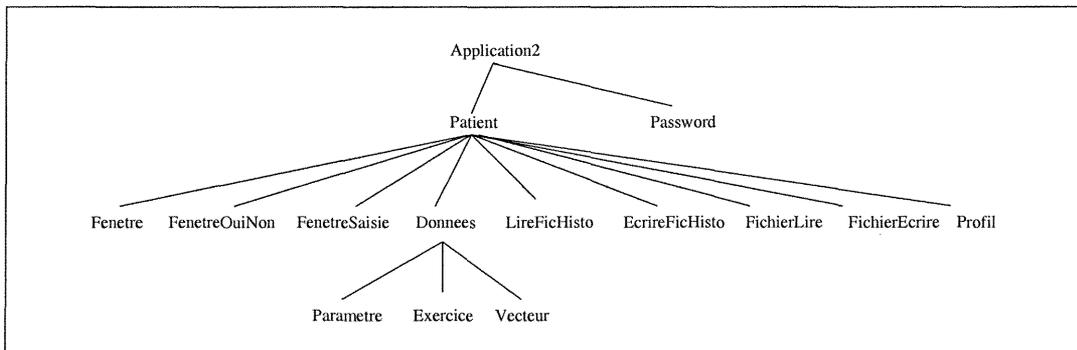


FIG. 8.19 – Les dépendances entre les classes pour l'application "Patient"

Les classes de cette application sont regroupées dans le projet "expert.jpr". Une schéma des dépendances entre classes est proposé sur la figure 8.19. La classe principale est **Application2**. Elle propose tout d'abord la saisie d'un nom de patient et d'un mot de passe (pour une visualisation de cette requête, se reporter à la figure 8.7 de la page 162). Si le mot de passe est exact, une instance de la classe **Patient** est alors initialisée.

La classe **Patient** permet de gérer la succession des exercices, de la lecture/écriture du profil ainsi que de l'historique. Elle comporte, entre autre, une instance de la classe **Profil**, et un tableau de productions. Le profil contient l'ensemble des valeurs des paramètres, valeurs mises à jour après chaque exercice. Le tableau des production, quant à lui, contient la totalité des productions du patient lors de la session en cours.

La classe **Profil** contient, comme nous l'avons signalé précédemment, l'ensemble des valeurs primaires et secondaires pour chaque paramètre.

La classe **Données** contient à la fois l'ensemble des données relatives aux exercices et aux différents

paramètres. Ces données sont initialisées dans le constructeur de la classe et sont statiques. Outre l'accès aux informations des exercices et des paramètres, cette classe propose un ensemble de fonctions permettant l'enchaînement des exercices. La classe **Profil** contient un tableau d'**Exercice** et de **Parametre**.

Un **Exercice** contient les caractéristiques suivantes :

- un numéro qui permet d'identifier les exercices ;
- un descriptif destiné à l'affichage ;
- un ou plusieurs paramètres primaires ;
- un certain nombre de paramètres secondaires ;
- pour chaque paramètre primaire, on indique à quelle catégorie l'exercice correspond.

Un **Paramètre** est composé d'un certain nombre d'ensembles flous. Chacun est caractérisé par un nom et quatre valeurs entières (figure 8.20). On suppose qu'il existe toujours au moins deux ensembles flous et que la totalité des degrés d'appartenance aux ensembles flous est toujours égale à 100 (nous avons choisi, afin de ne pas manipuler de décimaux, d'avoir recours à des pourcentages). L'appartenance d'une valeur d'un paramètre s'exprime sous la forme d'un vecteur.

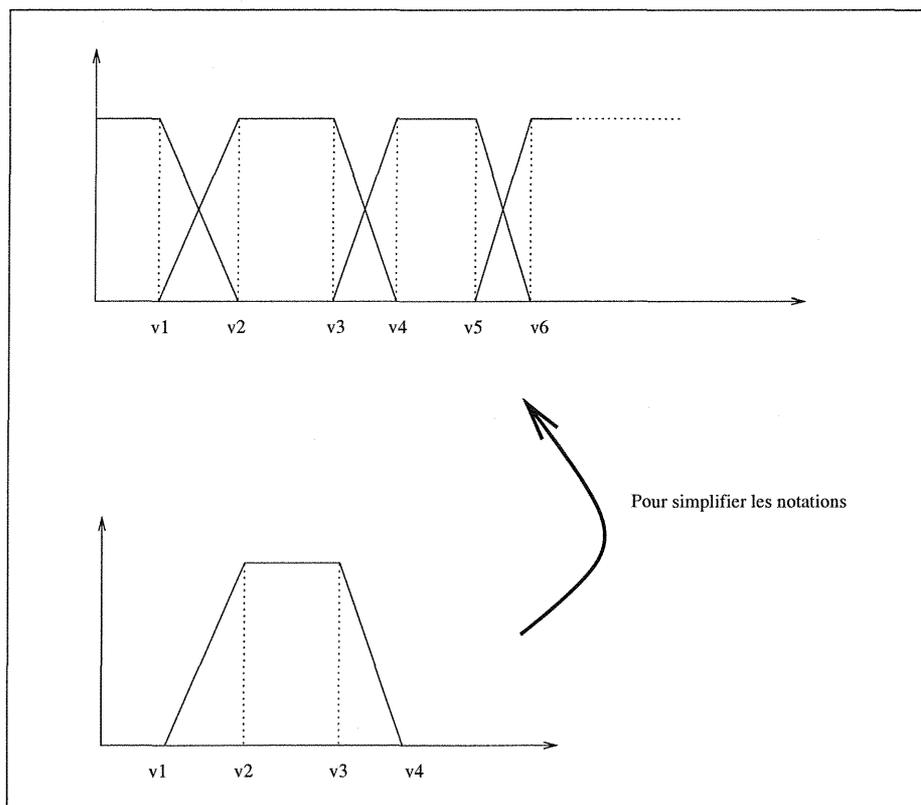


FIG. 8.20 – Un paramètre

La classe **Vecteur** est dédiée à contenir les valeurs des ensembles flous, qui se représentent sous la forme d'un vecteur de valeurs. Chaque valeur est un pourcentage et la somme de toutes les valeurs caractérisant la production est égale à 100.

Conclusion

Dans cette partie, nous avons exposé les choix, principes et notions sur lesquelles nous nous sommes penchés. Nous avons tenté de combiner les approches psychologique et informatique ce qui n'est pas aisé ; les objectifs poursuivis et les méthodes spécifiques à ces domaines sont relativement éloignés.

Toutefois, il est ressorti de ce travail diverses propositions. Tout d'abord, nous nous sommes fixé comme cadre théorique, le courant de type constructiviste.

Le modèle d'acquisition des connaissances sur lequel nous faisons reposer notre travail a pour principales caractéristiques d'envisager une construction de connaissances dynamiques au sein de schémas de plus en plus abstraits et en même temps, de plus en plus spécifique par les sous-schémas qui lui sont attachés et qui ont pour objectif de modéliser en quelque sorte les spécificités relatives aux contextes.

Au niveau de la stratégie pédagogique employée, nous nous plaçons dans un cadre d'apprentissage de "proche en proche" dans lequel ce qui diverge d'un élève à un autre, c'est l'aide que le tuteur apporte pour l'amener à la connaissance cible. Ajoutons à cela, qu'en raison de l'application elle-même qui est d'ordre rééducative, il est indispensable d'individualiser au maximum les interactions. Dans cette optique, nous proposons un processus intermédiaire d'intériorisation de l'état de connaissance du sujet pour une connaissance donnée afin de permettre d'accepter, dans des étapes intermédiaires de l'acquisition, des connaissances plus ou moins proches de la connaissance de référence mais constituant actuellement la référence du sujet. L'intérêt d'une telle conception est de permettre au système de considérer le sujet et ses possibilités actuelles et pas uniquement les connaissances à acquérir, ou le groupe de niveau dans lequel se situe le sujet.

D'un point de vue informatique, cela est réalisable et réalisé au travers d'une modélisation des connaissances qui permet une représentation qualitative des connaissances manipulées. En effet, il est indispensable de pouvoir représenter toutes les réponses d'un sujet et de pouvoir les catégoriser en fonction de l'écart qualitatif qui les sépare de la connaissance de référence. Pour ce faire, une représentation sous forme d'ensembles flous est proposé.

Associée à cette représentation, il faut que le système ait les moyens d'évaluer les réponses et d'intégrer des connaissances évolutives dans une modélisation de l'utilisateur. Le processus de traitement que nous proposons s'appuie sur la notion d'évaluation à plusieurs niveaux : une évaluation des connaissances en contexte et une hors contexte. Cette dernière se fait en continu. Elle permet ainsi de prendre en compte en temps réel les évolutions des comportements mesurés et ainsi, de l'état des connaissances.

Le guidage de l'utilisateur résulte d'un système de traitement relativement simple : une graphe des tâches. Les enchaînements pédagogiques résultent d'un parcours d'arbre.

Au niveau applicatif, nous proposons un logiciel d'architecture épiphyte, GEREV. Il vient se greffer sur un système de visualisation des paramètres intervenant dans la parole destiné à une population de non-entendants.

Ce système est effectif et est présenté, pour l'aspect informatique, dans le chapitre 8.

Conclusion Générale : Y A-T'il Une Vie Après Gerev ?

Les objectifs poursuivis

L'objectif de notre travail est de fournir les moyens à un système informatique d'apprentissage de proposer un guidage adapté de l'utilisateur. Ce guidage doit être totalement automatique et non prédéterminé. Il doit permettre au système d'offrir quel que soit l'état des connaissances de l'utilisateur, les conseils et l'enchaînement pédagogique adaptés à la réalité présente de l'utilisateur.

La réalisation applicative d'un tel objectif est mise en œuvre au travers d'un système de rééducation vocale pour déficients auditifs. Le domaine de la rééducation ainsi que celui du traitement de la parole présentent un certain nombre de spécificités. Celles-ci relèvent à la fois du domaine de connaissances manipulées qui ne sont pas réductibles à des règles ou à un système formel, et à la population visée. Cette dernière présente une forte hétérogénéité dans le niveau des compétences et des limitations physiques dans la progression des possibilités des sujets. Le processus de guidage est relativement complexe ; cette complexité résulte de l'ampleur des niveaux de compétences à couvrir, de la difficulté à définir précisément ce qu'est une connaissance correcte au niveau de la parole et de l'indispensable prise en compte des paliers d'évolution des connaissances pour une connaissance donnée, à l'intérieur d'une session d'apprentissage.

Outre ces difficultés, il est fondamental de tenir compte de l'évolution des connaissances dans le temps. Une connaissance, d'autant plus dans le domaine de la rééducation, n'est pas statique. Un système informatisé d'apprentissage doit être en mesure d'accepter et de prendre en compte des réponses de l'utilisateur reflétant un état des connaissances qui évolue à l'intérieur d'une session d'apprentissage mais aussi entre les différentes sessions. Celles-ci peuvent s'étaler sur une très longue période (de l'ordre de plusieurs mois).

Les thèmes de recherche abordés

Pour remplir les objectifs que nous venons de présenter, ainsi que les contraintes relatives à l'application retenue, notre travail a la volonté de faire cohabiter deux domaines de recherche qui sont les sciences computationnelles et humaines avec plus particulièrement pour les dernières, les études issues de la Psychologie et des Sciences de l'Education.

Notre approche, combinant les deux *philosophies* précédemment décrites, s'axe autour de plusieurs thèmes qui portent sur :

- la modélisation d'un processus d'apprentissage ;
- le choix d'une stratégie pédagogique ;
- la représentation des connaissances à acquérir et des connaissances acquises ;
- la définition du caractère acceptable d'une réponse de l'utilisateur ;

- le processus d'évaluation et de synthèse des réponses de l'élève ;
- le double niveau d'évaluation des réponses de l'utilisateur ;
- le processus de guidage (au niveau des conseils et aussi des enchaînements pédagogiques les plus adaptés).

Les solutions proposées

La modélisation d'un processus d'apprentissage

Nous nous sommes largement inspiré des travaux d'Anderson [Anderson 90] au niveau des étapes du processus. Nous considérons qu'une connaissance est mémorisée dans un premier temps avec son contexte d'utilisation. Une première phase d'abstraction des propriétés de la connaissance pour former un *schéma* particularisé à la situation est ensuite mise en œuvre. Avec la présentation de cette connaissance dans des contextes variés, une seconde phase d'abstraction et de constitution de schéma est entreprise dans laquelle une connaissance abstraite globale et générale est proposée ainsi, des sous graphes particularisés sont constitués à partir des différentes situations. Dans une telle modélisation, il y a acquisition et évolution constante des connaissances. Le schéma le plus complet à un instant donné peut être modifié en fonction des contextes et ne constitue pas un état final d'acquisition. Grâce à cette conceptualisation, les concepts de connaissances englobent la notion de dynamique du processus d'apprentissage tout en n'excluant pas la notion d'état à un instant donné. Le système informatique échappe ainsi à la difficulté des états cibles, plafonds ou de contradiction que l'on rencontre dans des tuteurs tels que XTRA-TE.

Une stratégie pédagogique

Dans une acquisition de connaissances, deux idées fortes sont à considérées conjointement. Elles portent sur la connaissance à acquérir d'une part et sur la prise en compte de l'état des connaissances du sujet d'autre part.

En ce qui concerne le sujet, il est faux de concevoir que sur un domaine non enseigné, le sujet est vierge de toute préconception. Il est nécessaire de prendre en compte, au préalable de tout apprentissage spécifique, les préconceptions du sujet afin de construire un système global de connaissances qui soit cohérent. Si le tuteur, humain ou informatique, néglige cet aspect, il s'expose à induire un système de connaissances parallèle aux préconceptions ou à modifier partiellement les préconceptions et ainsi conduire à une connaissance partielle, incomplète et incohérente puisque englobant des préconceptions qui ne sont pas forcément compatibles avec la connaissance à acquérir.

Quant à l'aspect concernant les connaissances elles-mêmes, il semble important de proposer une connaissance correcte, entière, et non des parties de celle-ci sous prétexte de faciliter la tâche d'acquisition du sujet. En morcelant la connaissance, on fournit au sujet la possibilité de la compléter lui-même ou d'émettre des hypothèses ou des conceptions erronées. Ce que nous proposons est la mise en application dans notre système informatique de la notion d'étayage. Cette position défend l'idée que ce qu'il faut adapter au sujet, ce n'est pas la connaissance mais plutôt l'aide à lui fournir pour accéder à la connaissance.

La mise en œuvre d'une telle stratégie est rendue possible par un mécanisme d'évaluation constant et performant que nous rapellons ensuite, par un mécanisme de guidage de l'utilisateur qui permet de choisir l'enchaînement pédagogique approprié ainsi que par une internalisation de l'état de connaissance du sujet. Cette internalisation consiste en, dans une session donnée, une modification de la donnée de référence. En fait, la référence qui est initialement la connaissance experte et plus précisément la

connaissance cible, va devenir pour un sujet donné, pour la session en cours, la performance obtenue par le sujet.

L'internalisation de la référence permet de considérer l'évolution des connaissances en terme d'écart par rapport à la connaissance cible tout en acceptant son état actuel.

La représentation des connaissances

Les spécificités des connaissances manipulées et les objectifs du système nous ont conduit à choisir un formalisme pour les connaissances du sujet mais également pour celles de l'expert de type qualification floue pour décrire l'étendue et la qualité des valeurs potentielles de chaque connaissance. Chaque connaissance est représentée au niveau de l'expert par plusieurs ensembles flous. Un ensemble flou correspond à une catégorie qualitative de valeurs possibles pour une connaissance. Les valeurs dans une catégorie sont comprises entre 0 et 1. Elles correspondent aux degrés d'appartenance d'une réponse d'un sujet à la catégorie et expriment des différences quantitatives entre les réponses d'une même catégorie qualitative.

Une production du sujet est représentée sous la forme de vecteur dans lequel chaque point correspond au degré d'appartenance à un ensemble flou et dans lequel il existe autant de points que d'ensembles.

A un niveau plus macroscopique, toutes les connaissances sont structurées au travers de schémas. Ces schémas, au niveau du sujet, vont être instanciés et contenir d'autres schémas dépendant du contexte ; c'est-à-dire que l'on va représenter dans le système l'état de performance observé à un moment dans une tâche et qu'à cette première représentation est associée un second niveau de représentation portant sur l'état de performance de cette connaissance dans un contexte différent.

Les avantages et raisons du choix d'un tel système de représentation résultent d'une volonté de représenter toutes les réponses possibles du sujet, de modéliser qualitativement (sous forme de stade en quelque sorte) une réponse tout en conservant la possibilité et la fonctionnalité de son évaluation quantitative. De plus, la structuration sous forme de schémas répond aux exigences du modèle d'acquisition des connaissances que nous avons brièvement rappelés ci-dessus.

Le caractère acceptable d'une réponse

Pour qualifier la réponse du sujet, il est nécessaire de disposer d'une référence experte qui permet de déterminer ce qui est correct du reste. Nous avons choisi de ne pas respecter une telle dichotomie et de concevoir la qualification des réponses en termes qualitatifs, en termes de distance par rapport à une catégorie cible. Cette conception permet de catégoriser les réponses du sujet en réponse "recherchée", "réponse proche de celle recherchée" ... La suppression du caractère booléen de l'état d'une connaissance au profit d'une catégorisation qualitative des réponses permet d'envisager une adaptation riche en fonction du type de réponses et de ne pas différencier des réponses "quantitativement" ou de formes différentes mais qualitativement équivalentes.

Néanmoins, il faut rappeler que ce caractère correct/incorrect de la réponse ou sa qualité dépend de la tâche à réaliser et de l'objectif pédagogique visé. En effet, indépendamment du sujet, le caractère correct d'une réponse est intimement lié à la consigne et non à une valeur intrinsèque de celle-ci.

Nous avons également recours à une notion d'acceptabilité d'une réponse. En effet, il est indispensable pour un système d'apprentissage de pouvoir concevoir qu'un utilisateur n'est pas en mesure actuellement de faire progresser son état de connaissances. Dans cette optique, le système doit être capable d'accepter une réponse différente de celle idéalement recherchée. On parle ici d'acceptation de la performance actuelle et non uniquement de sa mémorisation dans un profil avant de passer à une autre tâche. La notion d'acceptabilité, pour nous, inclut l'idée de prise en compte ultérieure de ce niveau, tout

au moins au sein d'une même session d'apprentissage. Cette acceptabilité est rendue possible grâce à l'internalisation de l'état de chaque connaissance chez un sujet.

Finalement, lorsque l'on s'intéresse au problème de la nature de la réponse, il s'avère nécessaire de définir ce qu'est et à partir de quand, il y a une différence entre deux réponses. Nous distinguons deux types de différences :

- les différences qualitatives. Elles résultent de la catégorisation des réponses des sujets dans des ensembles différents. Ces différences, au niveau de la proximité sémantique de deux réponses, sont importantes. Ce type de différence a un impact sur la nature même de la rétroaction à fournir à l'utilisateur ;
- les différences quantitatives. Elles résultent d'un écart, dans le degré d'appartenance à un ensemble, supérieur à un seuil. Cette différence détectée entre deux réponses est sémantiquement négligeable. Ce type de différence est à considérer lorsque l'on veut évaluer l'évolution de l'état de connaissance à l'intérieur d'une même catégorie.

Évaluation et synthèse des réponses

Toute réponse de l'utilisateur doit être évaluée. L'évaluation est un processus fondamental dans la mise en œuvre d'un apprentissage. Sa première fonction est de définir l'effet de l'apprentissage sur l'état de connaissance du sujet. Pour déterminer son impact, il est nécessaire de confronter la réponse du sujet avec la réponse attendue. Nous proposons également de confronter la réponse du sujet avec celles précédemment obtenues afin de mesurer l'éventuelle évolution des manifestations de la connaissance en jeu et de proposer une rétroaction permettant de conforter une amélioration des performances ou de rejeter le comportement amenant leur détérioration.

Toute réponse doit être évaluée et incorporée aux connaissances dont le système dispose. Dans un système d'apprentissage, une connaissance présentée à deux moments distincts peut donner lieu à deux performances différentes. Cette modification de la performance peut résulter de l'évolution de l'état des connaissances (modification d'ordre temporelle) ou de l'inattention et de la fatigue (une réponse bruitée). Nous ne tentons pas de minimiser l'effet d'une modification de performance lorsque celle-ci est probablement la résultante de l'inattention ou la fatigue. Nous pensons d'ailleurs que cette cause de modification de performance est très intéressante au sens où elle permet d'accéder à l'état de connaissances du sujet dans des conditions difficiles et donc d'approcher les limites de cet état. Nous présentons ainsi une conception de l'erreur comme source d'informations. Par conséquent, toutes les réponses des sujets sont évaluées et interviennent avec le même poids à un instant donné dans l'élaboration du profil.

Pour une connaissance donnée, l'état de connaissance est définie par un calcul d'une valeur théorique moyenne des performances. Cette moyenne est pondérée par un facteur qui attribue, en fonction du temps, une importance décroissante aux réponses du sujet. Le rapport entre deux pas de temps est toujours identique. Théoriquement, toutes les réponses fournies précédemment, dans une session d'apprentissage, sont prises en compte dans la constitution de cette moyenne. Toutefois, au delà des cinq dernières réponses, l'influence de la performance des réponses sur la moyenne est quasiment négligeable.

Une double évaluation

L'évaluation est un processus important dans un système d'apprentissage. Nous appliquons ce processus à plusieurs niveaux :

- au niveau de la comparaison entre les réponses successives du sujet afin de déterminer si il y a effectivement une évolution des connaissances et si cette dernière va dans le sens d'un progrès ou d'une détérioration de la performance mais aussi au niveau de la comparaison entre la réponse

du sujet et celle attendue afin de déterminer le niveau de performance du sujet, de déterminer si l'objectif est atteint ;

- au niveau des connaissances précédemment mises en œuvre et utilisées indirectement dans la tâche en cours. Chaque exercice ou phase d'apprentissage, quel que soit le système informatique, est mis en œuvre pour l'acquisition ou l'évaluation d'une tâche, d'une connaissance ou d'un ensemble de connaissances. Sa réalisation est conditionnée par les connaissances directement visées mais également par d'autres intervenant plus ou moins indirectement. Nous avons choisi de mettre en place un mécanisme d'évaluation de ces connaissances afin de les contrôler et de prévenir leur défaillance

A ces deux niveaux d'évaluation correspondent, pour chaque connaissance, deux états différents qui sont l'état de la connaissance lorsque celle-ci est primaire et son état lorsqu'elle est secondaire. A notre sens ces deux niveaux sont indispensables. Ils permettent à la fois d'adapter à un sujet, dans une session d'apprentissage, l'enchaînement pédagogique et de tenir compte de l'aspect dynamique du processus d'acquisition des connaissances. Le premier point est développé dans le paragraphe suivant. Nous ne nous intéressons ici qu'au second aspect de notre proposition : la prise en compte de la dynamique du processus d'acquisition. L'apparition d'une évaluation des connaissances indirectement mises en œuvre dans la tâche en cours va permettre de modéliser les différents stades du modèles que nous avons présenté dans la section page 174.

L'état primaire de la connaissance est obtenu lorsque l'on présente au sujet la connaissance plusieurs fois dans un même contexte (l'exercice dans lequel il y a plusieurs itérations d'une même tâche). Les itérations vont conduire à une certaine abstraction des caractéristiques de la connaissance. L'état primaire a donc pour objectif d'illustrer l'état de connaissance du sujet dans une situation particulière et unique. Dans notre esprit, la performance obtenue pour une connaissance dans cet état reflète les possibilités du sujet placé dans un état optimal ; le sujet porte toute son attention et est donc en mesure de contrôler au mieux l'application de la connaissance.

L'état secondaire est obtenu lors de l'évaluation de la connaissance alors qu'on l'utilise dans un contexte différent de celui rencontré lors de la présentation initiale de la connaissance. La performance obtenue est, à notre sens tout à fait intéressante dans la mesure où elle est d'une part obtenue insidieusement en quelque sorte puisque le sujet n'est pas officiellement évalué sur cette connaissance (faible attention accordée au contrôle de la tâche), et d'autre part reflète l'état de connaissance lorsque celle-ci est confronté à des situations multiples et variés. L'évaluation de la connaissance dans un état secondaire relève des mêmes processus que ceux mis en œuvre pour l'état primaire. Ce qui distingue ces deux états relève des situations dans lesquelles les données sont extraites et de l'interprétation ou la justification théorique qu'on leur attribue.

L'objectif d'un système d'apprentissage informatisé de ce type est que l'état secondaire de toutes les connaissances correspondent à la cible qualitative à atteindre idéalement.

Le guidage

Le passage d'une tâche à une autre est déterminé par la satisfaction d'une des trois contraintes suivantes :

- la performance obtenue trois fois successivement correspond à la performance cible recherchée ;
- la performance obtenue trois fois successivement est identique et de plus, différente de la cible. On considère alors qu'il n'y a actuellement plus de progrès et qu'il est inutile de poursuivre actuellement l'apprentissage
- le sujet décide délibérément de cesser l'apprentissage de cette connaissance.

Nous proposons un système de guidage qui repose sur un graphe de tâches dans lequel une tâche correspond au travail spécifique d'une connaissance. Le passage d'une tâche à une autre est conditionné par la satisfaction de tous les nœuds parents. Le graphe est constitué à partir de la connaissance de l'expert-pédagogue qui détermine pour chaque tâche les prérequis nécessaires à leur réalisation. Il les ordonne afin d'obtenir à la racine les tâches requérant le moins de connaissances préalables et aux feuilles, celles exigeant un bon nombre des connaissances mises en œuvre dans les tâches des nœuds parents.

Toutefois, l'enchaînement pédagogique proposé à un utilisateur ne se réduit pas à un simple parcours de graphe. à cette première couche, vient se superposer un second niveau de guidage et ceci, à l'intérieur même de la tâche. En effet, dans une tâche, définie comme l'apprentissage spécifique d'une connaissance, il existe plusieurs instances de cette dernière. Ces instances sont conçues pour mettre en exergue certains aspects de la connaissance. Le choix d'un exemplaire ne relève pas du hasard. Il résulte de l'état des connaissances du sujet. En effet, la dernière production ou la production moyenne théorique, dans le cas d'une nouvelle session d'apprentissage, amène le système à catégoriser qualitativement l'état actuel de connaissances du sujet. A chaque catégorie qualitative est associée un ensemble d'instances. Il est donc aisé de sélectionner, à partir de la dernière réponse du sujet, le prochain exemplaire de la tâche à proposer au sujet. Nous proposons ainsi un guidage d'une tâche à une autre et également d'une instance à une autre. Ces deux niveaux de guidage sont totalement adaptés au sujet puisque dépendants de ses réponses tout en étant pas prédéterminés à l'avance si ce n'est par leur attachement qualitatif.

De plus, nous avons fortement insisté sur le caractère évolutif des connaissances ainsi que sur leur importance dans les acquisitions futures. Par conséquent, nous proposons une évaluation constante des connaissances antérieurement abordées (les connaissances actuellement dans un état de connaissances secondaires) et un contrôle de leur niveau de performance. Lorsque ce niveau se détériore, et ceci plusieurs fois de suite (un certain seuil), le système propose au sujet de retourner au niveau de la tâche mettant en œuvre spécifiquement cette connaissance à l'état primaire.

Pourtant, il est nécessaire de comprendre que ce retour vers une tâche pour conforter et retrouver un certain niveau de performance pour une connaissance donnée n'est pas un retour arrière dans le graphe des tâches qu'il faudrait ensuite parcourir à nouveau. Ce retour à la connaissance primaire est totalement ponctuel et cessera dès que la performance de la connaissance aura, au moins, retrouvé son niveau de performance antérieur à la dégradation. Après cette interruption, l'apprentissage de la connaissance en cours peut reprendre.

La validation

Ce système n'a pas été validé sur la population à laquelle il est destiné. Il est en effet encore de l'ordre du prototype implanté et, vu les spécificités de celle-ci, il est tout à fait impossible de présenter un système expérimental et d'en extraire des conclusions pertinentes. Le système n'a donc fait l'objet que d'un jeu de simulation qui donne les résultats escomptés et décrits dans les chapitres portant sur l'évaluation et le guidage.

Toutefois, une validation du spécialiste-orthophoniste existe puisque le système repose sur une demande et des spécifications précises de la part de ceux-ci. La construction de l'enchaînement pédagogique est, part exemple, issue d'une réflexion et d'un travail en collaboration avec les orthophonistes demandeurs et intervenant dans le projet d'autonomisation et de guidage de SIRENE. De la même manière que SIRENE était réalisé en collaboration étroite avec ces spécialistes, GEREV résulte de l'émergence des besoins et souhaits des professionnels à offrir un système informatique fiable et permettant d'offrir une aide réelle au sujet.

Perspectives

Différentes propositions que nous avons faites sont généralisables et applicables à d'autres systèmes d'apprentissage (internalisation de la référence, mécanisme de guidage, mécanisme d'évaluation, principe d'évaluation, principe pédagogique ...). Toutefois, celles que nous aimerions mettre en œuvre et développer reposent sur deux thèmes qui sont :

- une extension du traitement qualitatif des connaissances ;
- une généralisation du traitement continu des connaissances antérieurement acquises.

Pour le premier point, le traitement qualitatif présente l'intérêt de pouvoir analyser une réponse davantage en fonction de sa valeur pédagogique qu'en fonction de sa forme particulière. Le tuteur visant l'acquisition d'une connaissance et non d'une forme, cette catégorisation des connaissances est plus adaptée qu'une catégorisation binaire en correct/incorrect. Mais surtout, ce qui nous semble particulièrement important de développer est la constitution dynamique de ces catégories. En effet, la catégorisation des solutions est dépendante certes des connaissances elles-mêmes mais surtout du niveau des sujets et de l'objectif pédagogique poursuivi. Ce que nous aimerions développer, c'est un mécanisme permettant de catégoriser dynamiquement les solutions en fonction d'un objectif fixé et/ou du niveau du sujet. Une catégorisation qualitative dépendante du niveau du sujet, semble relativement aisée à concevoir ; elle consiste, en quelque sorte, à étendre ou à rétrécir les catégories. Plus le niveau du sujet est élevé, plus le nombre des catégories peut être élevé. Par ailleurs, si on associe des conseils ou une rétroaction à fournir à la catégorie de la réponse du sujet, plus le niveau du sujet est élevé, plus la rétroaction doit être spécifique. Les exigences peuvent être importantes dans la mesure où le sujet maîtrise une bonne part des connaissances. Cette catégorisation et l'évolution de la catégorisation doit être ressentie pour chaque connaissance indépendamment et non globalement pour toutes les connaissances en fonction d'un niveau général estimé pour le sujet.

La constitution dynamique de ces classes n'implique cependant pas un traitement et une application *on-line* des modifications de la représentation des connaissances. *A priori*, une réalisation *on-line* est assez coûteuse à mettre en œuvre en temps réel et, dans un premier temps, une modification entre les sessions d'apprentissage est déjà une avancée conceptuelle et technique importante dans l'adaptation à l'utilisateur.

Quant à l'adaptation en fonction des objectifs pédagogiques, elle semble plus délicate au sens de plus difficile à mettre en place de façon non prédéterministe sauf si ceux-ci relèvent d'une simple variation du niveau d'exigence. Toutefois, étant donné qu'au travers d'un même exercice, plusieurs objectifs pédagogiques distincts peuvent être identifiables et présenter une certaine validité, il nous semble important de développer ce thème dans ce sens. Une première idée qu'il faut néanmoins approfondir est l'élaboration de catégories qualitatives auxquelles seraient associées des contraintes minimales à respecter. Ainsi, dès qu'un objectif pédagogique est établi, on demande aux enseignants de lier aux différentes catégories des contraintes particulières.

En ce qui concerne le second point, la généralisation des traitements des connaissances antérieurement acquises, nous pensons qu'il est important d'axer tout système d'apprentissage en contrôlant constamment les connaissances antérieurement mises en œuvre. L'apprentissage est un processus continu. Il faut par conséquent se donner les moyens de suivre et de contrôler son évolution afin d'agir au moment adéquat. Nous avons proposé un mode représentationnel ainsi qu'un double mécanisme d'évaluation pour remplir cet objectif. Il nous semble important de nous intéresser à d'autres systèmes d'apprentissage très différents afin de nous assurer de la pertinence et de l'applicabilité de nos propositions. Dans le cas contraire, il reste à déterminer d'autres propositions susceptibles de remplir cet objectif fondamental qu'est la prise en compte de l'état de connaissances du sujet pour toutes les connaissances envisagées lors du fonctionnement du système.

□

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY

Bibliographie

- [Abou-Jaoude 99] (S) Abou-Jaoude et (C) Frasson. Integrating a believable layer into traditional its. *AIED'99*, 1999.
- [Alinat 94] (P) Alinat et (M-C) Haton. Aide à la gestion de sa propre voix dans le temps par l'adulte ou l'adolescent sourd oralisé. Rapport, Thomson Sintra, 1994.
- [Alinat 97] (P) Alinat. Telematics applications programme 3004 de isaeus. Rapport, Thomson Marconi Sonar, 1997.
- [Anderson 76] (J.R) Anderson. *Language, memory and thought*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1976.
- [Anderson 83] (J.R) Anderson. *The architecture of cognition*. Havard University Press, 1983.
- [Anderson 85a] (J.R) Anderson. *Cognitive Psychologie and its implicatons*. W.H Freeman and Co., New York, 1985.
- [Anderson 85b] (J.R.) Anderson et (B.J.) Reiser. The lisp tutor. *Byte*, 10(4):159-175, 1985.
- [Anderson 90] (J.R) Anderson, (C.F) Boyle, (A.T) Corbett et (M.W) Lewis. Cognitive modelling and tutoring. *Artificial Intelligence*, 42:7-49, 1990.
- [Atkinson 68] (R.C) Atkinson et (R.M) Shiffrin. *The psychology of learning and motivation : advances in research and theory*, chapitre Human memory ; a proposed system and its control processes. New York Academic Press, 1968.
- [Baddeley 76] (A.D) Baddeley. *The psychologie of memory*. Harper International Edition, 1976.
- [Baddeley 86] (A.D) Baddeley. *Working memory*. 1986.
- [Baddeley 92] (A.D) Baddeley. Is working memory working? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 44A(1):1-31, 1992.
- [Bastien 87] (C) Bastien. *Schèmes et stratégies dans l'activité cognitive de l'enfant*. Paris : PUF, 1987.
- [Bastien 89] (C.) Bastien. Plaidoyer pour un apprentissage différencié. *Psychologie Française*, 4(34):271-276, 1989.
- [Beller 93] (S) Beller et (H.U) Hoppe. Deductive error reconstructing and classification in a logic programming framework. *Actes de Artificial Intelligence and Education*, pages 433-440, 1993.
- [Bernat 96] (P) Bernat. Modélisation des connaissances et de l'interaction dans un logiciel de résolution de problèmes en géométrie : Chypre. *Sciences et techniques éducatives*, 1996.
- [Besnard 89] (P) Besnard. Logiques formelles et raisonnement de bon sens. *Annales de Télécommunications*, volume 44, pages 242-250. 1989.

- [Bloch 94] (H) Bloch, (R) Chemana, (A) Gallo, (P) Leconte, (S) Moscovici, (M) Reuchlin et (E) Vurpillot. *Grand Dictionnaire de la Psychologie*. Larousse, 1994.
- [Bonnet 86] (C) Bonnet, (J.M) Hoc et (G) Tiberghien. *Psychologie, intelligence artificielle et automatique*. 1986.
- [Bonnet 89] (C) Bonnet, (R) Ghiglione et (J.F) Richard. *Traité de psychologie cognitive, T.1, Perception, action, langage*. Dunod, Paris, 1989.
- [Brecht 89] (B.J) Brecht, (G.I) Mac Calla, (J.E) Greer et (M) Jones. Planning the content of instruction. *Actes de Artificial Intelligence and Education*, pages 32–41, 1989.
- [Brown 78] (J.S) Brown et (R.R) Burton. Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematical skills. *Cognitive Science*, 2:155–192, 1978.
- [Brown 82] (J.S) Brown, (R.R) Burton et (J) De Kleer. *Intelligent Tutoring Systems*, chapitre Pedagogical, Natural langage and Knowledge Engineering Techniques in SOPHIE I, II and III, pages 227–282. Academic Press, London, 1982.
- [Brown 95] Brown et (T.R) bailey. *Learning to work : employer involvement in school-to-work transition programs*. 1995.
- [Bruillard 97] (E) Bruillard. *Les machines à enseigner*. 1997.
- [Bruner 66] (J.) Bruner. *Toward a Theory of Instruction*. Cambridge: Havard University Press, 1966.
- [Bruner 68] (J.S) Bruner et (B.M) Bruner. On voluntary action and its hierarchical structure. *International Journal of Psychologie*, 3:239–255, 1968.
- [Bruner 86] (J.) Bruner. *Actual Minds, Possible Worlds*. Cambridge: Havard University Press, 1986.
- [Bruner 90] (J) Bruner. *Acts of Meaning*. Cambridge: Havard University Press, 1990.
- [Burton 82] (R) Burton. *Intelligent Tutoring Systems*, chapitre Diagnosing bugs in a simple procedural skill, pages 157–182. London Academic Press, 1982.
- [Carbonell 70] (J.R) Carbonell. Ai in cai : an artificial intelligence approach to computer-assisted instruction. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, 11(4), 1970.
- [Carpentier 98] Carpentier. *Modélisation des connaissances et de la démonstration pour l'E.I.A.O. de la géométrie*. Thèse de Doctorat, Rennes, 1998.
- [Carr 77] (B) Carr et (I.P) Goldstein. Overlays: a theory of modeling for computer-aided instruction. Rapport, Massachusetts Institute of Technology, 1977.
- [Carton 82] (F) Carton. *Atlas linguistique et ethnographique du Centre. Vol. 3. La grammair*. Atlas linguistiques de la France par régions. 1982.
- [Cauzinille-Marmeche 85] (E) Cauzinille-Marmeche, (J) Mathieu et (A) Weil-Barais. Raisonnement analogique et résolution de problème. *Année Psychologique*, 85:49–72, 1985.
- [Chen 89] (L) Chen et (B.L) Kurtz. Xtra-te : Using natural language processing software to develop an its for language learning. *Actes de Artificial Intelligence and Education*, pages 54–63, 1989.
- [Clancey 79] (W) Clancey. Tutoring rules for guiding a case method dialogue. *International Journal of Man-Machine studies*, 11:25–49, 1979.
- [Clancey 83] (J.R) Clancey. Guidon. *Journal of computer-based instruction*, 10(1):8–14, 1983.

- [Clancey 87] (W.J) Clancey. *Artificial Intelligence and Instruction*, chapitre Methodology for Building an Intelligent Tutoring system. Addison-Wesley, 1987.
- [Clancey 94] (W.J) Clancey. *Situated cognition : how representations are created and given meaning*. Lewis, (B) and Mendelsohn, (P), Amsterdam : North Holland, 1994.
- [Cohen 85] (P.R) Cohen. *Heuristic Reasoning about Uncertainty: An Artificial Intelligence Approach*. Pitman, 1985.
- [Collins 75] (A.M) Collins et (E.F) Loftus. A spreading activation theory of semantic processing. *Psychological Review*, 82:407–428, 1975.
- [Corbett 95] A.T Corbett et J.R Anderson. Model tracing: Modeling the acquisition of procedural knowledge. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 1995.
- [Craik 72] (F.I.M) Craik et (R.S) Lockhart. Level of processing : a framework for memory research. *Journal of verbal Learning and verbal Behavior*, (11):671–684, 1972.
- [Danna 97] (F) Danna. *Modélisation de l'apprenant dans un logiciel d'Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur - Application à un tutoriel intelligent dédié aux composés anglais*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 1997.
- [Dede 86] C. Dede. A review and synthesis of recent research in intelligent computer-assisted instruction. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24:329–353, 86.
- [Denis 89] (M.) Denis. *Image et Cognition*. 1989.
- [Dillenbourg 91] (P) Dillenbourg et (J.A) Self. A framework for learner modelling. *Interactive Learning Environments*, 2(2):111–137, 1991.
- [Djamen 94] (J.Y) Djamen, (M) Kaltenbach et (C) Frasson. Pif-g: Graphe de connaissances de l'apprenant dans un sti. Rapport, Université de Montreal, DIRO, 1994.
- [Djamen 95] (J.Y) Djamen. *Architecture de système tutoriel intelligent pour l'analyse du raisonnement de l'apprenant*. Thèse de Doctorat, Université de Montréal, 1995.
- [Fortin 92] (C) Fortin et (R) Rousseau. *Psychologie cognitive : une approche de traitement de l'information*. 1992.
- [Freinet 50a] (C.) Freinet. *Essai de psychologie sensible appliquée à l'éducation*, volume 1. Delachaux and Niestle, 1950.
- [Freinet 50b] (C.) Freinet. *Essai de psychologie sensible appliquée à l'éducation*, volume 2. Delachaux and Niestle, 1950.
- [Fum 92] (D) Fum, (B) Pani et (C) Tasso. Naive vs. formal grammars: A case for integration in the design of a foreign language tutor. Springer-Verlag, éditeur, *Actes des journées Intelligent Tutoring Systems for Foreign Language Learning*, pages 51–64. Swartz, (M.L) and Yazdani, (M), 1992.
- [Gagne 87] (R.M) Gagne et Glaser(R). *Foundations in learning research*. Hillsdale, (NJ) : Lawrence Erlbaum Associates, 1987.
- [Gavignet 91] (E) Gavignet. *Environnement de conception de systèmes d'apprentissage : Une modélisation de la connaissance pédagogique*. Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, 1991.

- [George 83] (C) George. *Apprendre par l'action*. Paris: PUF, 1983.
- [George 86] (C) George. Généralisation inductive et déductive dans un apprentissage par l'action. *L'Année Psychologique*, 86:183–200, 1986.
- [George 88] (C) George. *Les automatismes cognitifs*, chapitre Interactions entre les connaissances déclaratives et procédurales. Mardaga, 1988.
- [Giasson 97] (J) Giasson. L'intervention auprès des élèves en difficulté de lecture: bilan et prospectives. *Éducation et francophonie, édition électronique.*, 25(2), 1997.
- [Giroux 95] (S) Giroux, (F) Pachet et (G) Paquette. Des systèmes multi-agents épiphytes. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 1995.
- [Goldstein 82a] (I.P) Goldstein. *The Genetic Graph: A Representation for the Evolution of Procedural Knowledge*, chapitre Computer-based Coaches, pages 51–78. Academic Press, 1982.
- [Goldstein 82b] (I.P) Goldstein. *Handbook of Artificial Intelligence*, volume 2, chapitre WUMPUS. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1982.
- [Govaere 99a] (V) Govaere. A combination of representation style for the acquisition of speech skills. *AIED'99*, 1999.
- [Govaere 99b] (V) Govaere. Représentation des connaissances à l'aide d'une qualification floue et de frames dans un environnement manipulant des normes. *Actes du III Colloque Jeunes Chercheurs en Sciences Cognitives*, 1999.
- [Guin 91] (D) Guin, (M.A) Egret, (B) Koch, (G) Kuntz, (G) Metivier et (N) Vogel. Modélisation de la démonstration géométrique dans geometry tutor. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, 1991.
- [Haton 91] (J-P) Haton, (N) Bouzid, (F) Charpillet, (M-C) Haton, (H) Lâasri, (T) Mondot et (A) Napoli. *Le raisonnement en intelligence artificielle - Modèles, techniques et architectures pour les systèmes à bases de connaissances*. InterEditions, 1991.
- [Haton 98] (M-C) Haton. Issues in self evaluation and correction of speech. *Computational Models of speech Pattern Processing*, 1998.
- [Holt 94] (P) Holt, (S) Dubs, (M) Jones et (J.-E) Greer. The state of student modeling. (J.-E) Greer et (G.I.) MacCalla, éditeurs, *Actes des journées Student Modelling: The Key to Individualized Knowledge-Based Instruction*. Springer-Verlag, 1994.
- [Huang 90] (X) Huang, (G.I) Mac Call et (J.E) Greer. Student model revision: Evolution and revolution. *Actes de la huitième conférence bi-annuelle de la Canadian Society for Computational Studies of Intelligence*, 1990.
- [Huang 94] (X) Huang. Modelling a student's inconsistent beliefs and attention. (J.E) Greer et (G.I) Mac Calla, éditeurs, *Actes des Journées Student Modelling: The key to Individualized Knowledge-Based Instruction*, pages 267–280. Springer-Verlag, 1994.
- [Ikeda 93] (M) Ikeda, (Y) Kono et (R) Mizoguchi. Non monotonic model inference - a formalization of student modeling. *Actes de International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pages 467–473, 1993.
- [Johnson 90] C.W Johnson. Using temporal logic to prototype interactive systems. Diaper-D. Gilmore D. Cockton, G. et B. Shalckel, éditeurs, *Human-Computer Interaction-INTERACT'90*, pages 1019–1021, Netherlands, 1990. elsevier Science Publications.

- [Johnson-Laird 82] (P) Johnson-Laird. *Perspectives on mental representations: Experimental and theoretical studies of cognitive processes and capacities*, chapitre Propositional representations, procedural semantics, and mental models. Hillsdale, (N.J) and Erlbaum, 1982.
- [Johnson-Laird 83] (P) Johnson-Laird. *Mental Models*. Harvard University Press, 1983.
- [Kass 87] (R) Kass. The role of user modelling in intelligent tutoring system. Rapport, Moore School, Université de Pennsylvanie, 1987.
- [Kass 88] (R) Kass. *Student Modelling in Intelligent Tutoring Systems - Implications for User Modelling*, chapitre User Models in Dialog Systems, pages 386–410. Springer-Verlag, 1988.
- [Katz 92] Lesgold-(A.) Eggan (G.) Katz, (S.) et (M.) Gordin. Modelling the student in sherlock ii. *Artificial Intelligence in Education*, 1992.
- [Katz 94] (S) Katz, (A) Lesgold, (G) Eggan et (M) Gordin. Modelling the student in sherlock ii. Springer-Verlag, éditeur, *Actes des journées Student Modelling: The Key to Individualized Knowledge-Based Instruction*, pages 99–126. Greer, (J.E) and Mac Calla, (G.I), 1994.
- [Kosslyn 78] (S.M) Kosslyn. *Memory and development in Children*, chapitre The representational-development hypothesis. Hillsdale, Erlbaum, 1978.
- [Kumycz 92] (M) Kumycz et (G.I) Webb. *Intelligent tutoring systems*, chapitre Cognitive Models, pages 269–276. 1992.
- [Labat 90] (J.M) Labat. *Une contribution à l'amélioration des capacités pédagogiques des tuteurs intelligents*. Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 1990.
- [Laborde 95] (J.M) Laborde. Des connaissances abstraites aux réalités artificielles, le concept de micromonde cabri. *Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur*, pages 29–41, 1995.
- [Le Ny 75] (J.-F) Le Ny. *Le Conditionnement et l'apprentissage*. PUF, Paris, 1975.
- [Leonard 84] (F) Leonard. L'interprétation des effets de contenus : changement de réponse ou changement de raisonnement? *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 5:475–493, 1984.
- [Lesgold 92] Lajoie-(S.P.) Bunzo (M.) Lesgold, (A.) et (G.) Eggan. *Computer Assisted Instruction and intelligent Tutoring Systems: Shared goals and complementary approaches*, chapitre SHERLOCK: A Coached Practice Environnement for an Electronic Troubleshooting Job. Hillsdale, Lawrence Erlbaum Associates, 1992.
- [Lindsay 77] (P.H) Lindsay et (D.A) Norman. *Human information processing*. New York, Academic Press, 1977.
- [Lindsay 80] (P.H) Lindsay et (D.A) Norman. *Traitement de l'information et comportement humain: une introduction à la psychologie*. Saint-Laurent: Etudes vivantes, 1980.
- [Lories 84] (G) Lories. La mémoire des joueurs d'échecs. *L'Année psychologique*, 84:95–122, 1984.
- [Malmberg 98] (B) Malmberg. *La phonétique*. Presses Universitaires de France, 1998.
- [Mars-Gouraud 99] (A) Mars-Gouraud et Jamet (F). Qu'est-ce que l'électricité pour l'enfant de 6 ans? *Actes du III Colloque Jeunes Chercheurs en Sciences Cognitives*, pages 149–153, 1999.

- [McCalla 86] (G) McCalla, (R) Bunt et (J) Harms. The design of the scent automated advisor. *Computational Intelligence*, 2(2):76–92, 1986.
- [Mendelsohn 95] (P) Mendelsohn. Eiao et psychologie cognitive. *Sciences et Techniques Educatives*, 2(1):9–29, 1995.
- [Milgram 61] (S) Milgram. Nationalty and conformity. *Scientific American*, 205:45–51, 1961.
- [Montessori 94] (M) Montessori. *Pédagogie scientifique : la maison des enfants*, volume 1. Desclee de Brouwer, 1994.
- [Murray 88] (W) Murray. *Automatic program debugging for intelligent tutoring systems*. Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [Murray 91] (W.R) Murray. An endorsement-based approach to student modeling for planner-controlled tutors. *IJCAI*, pages 1100–1106, 1991.
- [Newell 63] (A) Newell et (H.A) Simon. *Computer and Thought*, chapitre GPS a program that simulates human thought. Mc Graw Hill, 1963.
- [Newell 72] (A) Newell et (H.A) Simon. *Human problem solving*. Englewood Cliffs, (N.J) and Prentice Hall, 1972.
- [Nicaud 88] (J.F) Nicaud et (M) Vivet. Les tuteurs intelligents : réalisations et tendances de recherches. *Techniques et Science Informatiques*, 7(1):21–45, 1988.
- [Ohlsson 87] (S) Ohlsson. *AI and Education: Learning Environments and Intelligent Tutoring System*, chapitre Some principle of intelligent tutoring. Ablex Publishing, Norwood, 1987.
- [Ohlsson 92] (S) Ohlsson. Constraint-based student modelling. *Artificial Intelligence and Education*, volume 3, pages 429–447, 1992.
- [Ortony 79] (A) Ortony. Beyond literal similarity. *Psychological Review*, 86:161–180, 1979.
- [Pachet 96] (F) Pachet, (J.Y) Djamen, (C) Frasson et (M) Kaltenbach. Un mécabisme de production de conseils exploitant les relations de composition et de précedence dans un arbre de tâches. *Sciences et techniques éducatives*, 3(1):43–75, 1996.
- [Paivio 71] (A.) Paivio. *Imagery and verbal processes*. 1971.
- [Palies 85] (O) Palies, (E) Cauzinille-Marmeche, (M) Caillot et (J) Mathieu. Simulation par système-expert du fonctionnement cognitif ; application à l'e.a.o. *Cognitive 1985*, 1985.
- [Papalia 88] (D.E) Papalia et (S) Wenks Olds. *Introduction à la psychologie*. McGraw-Hill: New-York, 1988.
- [Papert 81] (S.) Papert. *Jaillissement de l'esprit : ordinateurs et apprentissage*. Flammarion, Paris, 1981.
- [Paquette 94] (G) Paquette, (F) Crevier et (C) Aubin. Knowledge in a course design workbench. *Educationnal Technology*, 34(9):50–57, november 1994.
- [Piaget 74] (J) Piaget. *La prise de conscience*. Presses Universitaires de France, Paris, 1974.
- [Polson 88] (M.C) Polson et (J) Richardson. *Foundations of Intelligent Tutoring systems*. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1988.
- [Py 96] (D) Py. Aide à la démonstration en géométrie : le projet mentoniez. *Sciences et Techniques éducatives*, 3(2):227–256, 1996.

- [Richard 90] (J-F) Richard. *Les activités mentales, comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Armand Colin, Paris, 1990.
- [Rogers 98] (C.R.) Rogers. *Le développement de la personne*. 1998.
- [Rondal 83] (J.A) Rondal. *L'interaction adulte - enfant et la construction du langage*. Pierre Mardaga, 1983.
- [Rumelhart 77] (D.E) Rumelhart et (A) Ortony. *Schooling and the acquisition of Knowledge*, chapitre The representation of knowledge in memory. Hillsdale and Erlbaum, (N.J), 1977.
- [Schank 77] (R.C) Schank et (R.P) Abelson. *Scripts, plans, goals and understanding*. 1977.
- [Self 87] (J.A) Self. Students models: What use are they? *IFIP/TC3*, pages 73–85, 1987.
- [Self 88] (J) Self. Bypassing the tractable problem of student modelling. *Intelligent Tutoring Systems Conference*, pages 18–24, Montreal, 1988.
- [Self 94] (J) Self. Formal approaches to student modelling. (J.E) Greer et MacCalla (G.I), éditeurs, *Actes des journées Student Modelling : The Key to Individualized Knowledge-Based Instruction*, pages 295–354. Springer-Verlag, 1994.
- [Shortliffe 76] (E.H) Shortliffe. *Computer-based medical consultation: MYCIN*. American Elsevier, 1976.
- [Siou 94] (E) Siou. *Programmation logique inductive et modélisation de l'apprenant ; application à l'analyse des erreurs de raisonnement chez l'aphasique*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 1994.
- [Skinner 85] (B.F.) Skinner. Cognitive science and behaviorism. *British Journal of Psychology*, (76):291–301, 1985.
- [Sleeman 79] D.H. Sleeman et R.J Hendley. Ace: a system which analyses complex explanations. *Man Machine Studies*, 1979.
- [Sleeman 82] (D.H) Sleeman et (J.S) Brown. *Intelligent Tutoring Systems*. New York: Academic Press, 1982.
- [Soloway 85] (E) Soloway et (W.L) Johnson. "proust". *Byte*, 10(4), 1985.
- [Spreen 88] (O) Spreen. *Learning disabled children growing up : a follow-up into adulthood*. 1988.
- [Swartz 92] (M.L) Swartz. Introduction. pages 1–6. Springer-Verlag, 1992.
- [Tasso 92] (C) Tasso, (D) Fum et (P) Gianfrandi. The use of explanation-based learning for modeling student. Springer-Verlag, éditeur, *Actes des journées Intelligent Tutoring Systems for Foreign Language Learning*, pages 151–170. Swartz, (M.L) and Yazdani, (M), 1992.
- [Tiberghien 91] (G) Tiberghien. *Neuropsychologie de la mémoire humaine*, chapitre Psychologie de la mémoire humaine, pages 9–37. Presses Universitaires de Grenoble, 1991.
- [Tran-thong 69] Tran-thong. *La pensée pédagogique d'Henri Wallon, (1879-1962)*. Paris, PUF, 1969.
- [Trognon 92] (A) Trognon. *Psychisme et intelligence artificielle*, chapitre Cognitivism et pragmatisme dans la modélisation des fonctions socio-cognitives, pages 73–90. Presses Universitaires de Nancy, 1992.
- [Tulving 88] (E) Tulving. Memory performance, knowledge and experience. *European Journal of Cognitive Psychology*, 1:3–26, 1988.

- [VanLehn 87] (K) VanLehn. Learning one subprocedure per lesson. *Artificial Intelligence*, 31(1):1-40, 1987.
- [Vanlehn 88] (K) Vanlehn. *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*, chapitre Student modeling, pages 55-78. LEA publishers, 1988.
- [Vasta 82] (R) Vasta. *Strategies and techniques of child study*. 1982.
- [Vygotsky 78] (L.S) Vygotsky. *Mind in Society. The development of higher psychological processes*. Cambridge: Havard University Press, 1978.
- [Wallon 86] (H) Wallon. *H. Wallon: écrits fondamentaux. Enfance*. Paris: presses Universitaires de France, 7 édition, 1986.
- [Webb 93] (G.I) Webb. Feature based modelling. *Artificial Intelligence and Education*, pages 497-504, 1993.
- [Wenger 87] (E) Wenger. *Artificial Intelligence and Tutoring Systems - Computational and Cognitive Approaches to the Communication of Knowledge*. Morgan Kauffman publishers, 1987.
- [White 85] B.Y White et J.R Frederiksen. Quest: qualitative understanding of electrical system troubleshooting. *ACM SIGART Newsletter*, volume 93, pages 34-37, 1985.
- [White 87] (B.Y) White et (J.R) Frederiksen. Qualitative models and interactive learning environnements. Norwood Ablex Publishing, éditeur, *Artificial Intelligence and Education*, pages 281-306, 1987.
- [Yerkes 08] (R.M) Yerkes et (J.D) Dodson. The relation of strength of stimulus to rapidity of habit formation. *Journal of Comparative and Neurological Psychology*, 18:459-482, 1908.

S.C.D. - U.H.P. NANCY I
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY