

N° d'ordre : 1541

Année 1995

50376
1995
161

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR

en Productique : Automatique et Informatique Industrielle

par

Jean-Marc VANNOBEL

CONTRIBUTION A L'ELABORATION D'UN TUTEUR INTELLIGENT
D'AIDE A LA REEDUCATION DES TROUBLES DU LANGAGE :
**EVALUATION DE L'APTITUDE DE PERSONNES CEREBRO-LESEES
A UTILISER UN ENVIRONNEMENT GRAPHIQUE.**

Soutenu le 07 septembre 1995 devant le jury composé de :

MM.

P. VIDAL	Président	Professeur à l'U.S.T.L.
J.-M. TOULOTTE	Directeur de Recherche	Professeur à l'U.S.T.L.
J. BREMONT	Rapporteur	Professeur au C.R.A.N., Université de Nancy 1
N. MALVACHE	Rapporteur	Professeur au L.A.I.H., Université de Valenciennes
G. DELOCHE	Examineur	Docteur ès-Sciences, Hôpital Pitié-Salpêtrière, Paris
O. GODEFROY	Invité	Praticien au Service de Neurologie B, C.H.R. de Lille

SCD LILLE 1



D 030 257032 7

H

AVANT PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Centre d'Automatique de l'Université des Sciences et Technologies de Lille1.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur le Professeur Pierre VIDAL pour l'accueil qu'il m'a réservé au sein de son laboratoire. Je le remercie vivement d'avoir accepté la présidence de mon jury de thèse.

Toute ma reconnaissance et mes sentiments respectueux vont à Monsieur le Professeur Jean-Marc TOULOTTE pour la confiance et le soutien qu'il m'a témoigné tout au long de ces travaux.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur Jacques BREMONT, Directeur de Recherche au Centre de Recherche et d'Automatique de Nancy et Monsieur le Professeur Noël MALVACHE, Directeur du Laboratoire d'Automatique Industrielle et Humaine de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, de me faire l'honneur d'être rapporteurs de mon travail.

Mes remerciements vont également à Monsieur Gérard DELOCHE, Docteur ès-Sciences et Ingénieur de Recherche à l'I.N.S.E.R.M., Hôpital de la Salpêtrière de Paris, et à Monsieur Olivier GODEFROY, Praticien au Service Neurologie B du C.H.R. de Lille, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de siéger à la commission d'examen.

Je tiens aussi à remercier particulièrement Mademoiselle Brigitte DEBACHY, orthophoniste au C.H.R. de Lille, qui a réalisé l'examen neurologique des patients ayant participé à cette étude et qui m'a également fourni de précieux conseils et renseignements.

Enfin, je tiens à remercier mes proches ainsi que l'ensemble des personnes qui m'ont aidé à mener à bien ce travail par leurs encouragements et par leur participation à l'étude expérimentale ou à la relecture de ce manuscrit.



Pour m'avoir toujours encouragé quand il le fallait,
pour toute l'aide que tu m'as apportée et enfin
parce que tu es celle que j'aime par dessus tout,
je voudrais te dédier ce mémoire, à toi SANDRA

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE	9
Chapitre I LES TROUBLES DU LANGAGE ET LEUR REEDUCATION	13
I.1 Introduction	13
I.2 La neuropsychologie	13
I.2.1 Présentation	13
I.2.2. Localisation et latéralisation des fonctions du langage	14
I.2.3 La neuropsychologie cognitive	14
I.3 Les troubles du langage acquis : l'aphasie.....	15
I.3.1 L'aphasie.....	15
I.3.2 Avertissement.....	16
I.3.3 Troubles du langage oral	17
I.3.3.1 Troubles de l'expression verbale(anarthrie).....	17
I.3.3.1.1 Troubles articulatoires	17
I.3.3.1.2 Troubles de la réduction du langage.....	17
I.3.3.1.3 Les dyssyntaxies (paragrammatisme).....	18
I.3.3.1.4 Les paraphasies.....	18
I.3.3.1.5 La jargonaphasie.....	18
I.3.3.2 Troubles de la compréhension verbale (surdité verbale).....	19
I.3.4 Troubles du langage écrit	19
I.3.4.1 Troubles de l'expression écrite (agraphie).....	19
I.3.4.2 Troubles de la compréhension écrite (cécité verbale)	20
I.4 Les principales formes cliniques des aphasies	20
I.4.1 Présentation	20
I.4.2 Aphasie d'expression	21
I.4.2.1 Tableau clinique	21
IV.4.2.2 Généralités anatomiques et pronostic de récupération.....	21
I.4.3 Aphasie de compréhension.....	21
I.4.3.1 Tableau clinique	21
I.4.3.2 Généralités anatomiques et pronostic de récupération	22
I.4.4 Aphasie de conduction	22
I.4.5 Aphasies mixtes et globales.....	23
I.4.6 Les principales causes d'aphasie [MAZ 84]	23
I.5 La rééducation des troubles du langage	23
I.5.1 Introduction [PAR 94].....	23
I.5.2 La récupération spontanée [THI 86]	24
I.5.3 Un maître mot en rééducation : adapter	24
I.5.4 Le but de la rééducation	25
I.5.5 Méthodes de rééducation [SER 86, PAR 94]	26
I.5.5.1 Introduction	26
I.5.5.2 Les stratégies de rétablissement.....	26
I.5.5.3 Les stratégies de réorganisation.....	27
I.5.5.3.1 Stratégies de réorganisation des processus centraux	27
I.5.5.3.2 Stratégies de modification des systèmes afférents et efférents	27
I.5.5.4 Les stratégies de facilitation	28
I.5.5.5 Les stratégies palliatives	28
I.5.6 Les étapes de la rééducation	29
I.5.6.1 Quand démarrer un programme de rééducation ?	29
I.5.6.2 Hiérarchie des séquences.....	29
I.5.6.3 Evaluation de l'efficacité de la rééducation.....	30

I.5.6.4 La fin d'un programme de rééducation	31
I.5.7 Cas de l'aphasique global.....	32
I.6 Conclusion.....	32

Chapitre 2 SPECIFICATIONS D'UN TUTEUR DE REEDUCATION DES TROUBLES DU

LANGAGE..... 33

II.1 Introduction..... 34

II.2 Limitations matérielles..... 34

II.3 Les composantes d'un tuteur à l'usage du cérébro-lésé..... 34

II.3.1 La communication Homme-Machine 34

II.3.1.1 Introduction..... 34

II.3.1.2 L'avènement des interfaces utilisateur graphiques 35

II.3.1.3 Ergonomie et Interfaces Homme / Machine (I.H.M.) 36

II.3.1.4 Facultés cognitives importantes pour l'utilisation d'I.H.M. 37

II.3.1.4.1 Mémoire à court terme 37

II.3.1.4.2 Attention, vigilance et conduites automatiques 38

II.3.1.4.2.1 Attention..... 38

II.3.1.4.2.2 Vigilance 38

II.3.1.4.2.3 Conduites automatiques [SIE 94] 39

II.3.1.4.2.4 Récapitulatif 39

II.3.1.5. Interfaces utilisateur et troubles du langage 40

II.3.1.5.1 Introduction..... 40

II.3.1.5.2 Conséquences liées à la limitation de la mémoire à court terme..... 40

II.3.1.5.3 Autres troubles qui peuvent accompagner l'aphasie..... 41

II.3.1.5.3.1 Troubles de la motricité..... 41

II.3.1.5.3.2 Troubles de la vigilance et de l'attention 41

II.3.1.5.3.3 Troubles de la mémoire..... 42

II.3.1.5.3.4 Troubles visuo-spatiaux 42

II.3.1.5.3.5 Troubles de la vision des couleurs [LHE 69]..... 42

II.3.1.5.3.6 Fatigabilité et lenteur..... 42

II.3.1.5.3.7 Désorientation spatiale 43

II.3.1.5.4 Principes ergonomiques de réalisation de l'I.H.M. 43

II.3.1.5.4.1 Pertinence de l'information..... 43

II.3.1.5.4.2 Automaticité des conduites..... 44

II.3.1.5.4.3 Rapidité de l'interface 44

II.3.1.6 L'environnement informatique d'un tuteur pour cérébro-lésés..... 45

II.3.1.6.1 Introduction..... 45

II.3.1.6.2 Matériel de rééducation traditionnel..... 45

II.3.1.6.3 Les organes d'entrée et de sortie à envisager 46

II.3.1.6.3.1. Entrée manuelle..... 46

II.3.1.6.3.2 Reconnaissance de la parole 48

II.3.1.6.4 Les organes de sortie 48

II.3.1.6.4.1 Sortie écrite..... 48

II.3.1.6.4.2 Production de parole..... 49

II.3.1.6.5 Gestion des entrées / sorties 49

II.3.1.6.5.1 Limiter les erreurs d'entrée 49

II.3.1.6.5.2 Présentation de l'information 50

II.3.1.7 Conclusion 51

II.3.2 L'expert 51

II.3.3 Le pédagogue..... 52

II.3.3.1 Introduction..... 52

II.3.3.2 Moyens pédagogiques..... 53

II.3.3.3 Les grammaires élémentaires induites [GUY 87] 54

II.3.3.4 Le comportement d'autocorrection chez l'aphasique..... 56

II.3.4 Le modèle de l'élève..... 57

II.3.4.1 Introduction..... 57

II.3.4.2 Exemples de modélisations de l'élève 57

II.3.4.2.1 Le modèle de connaissance partielle	57
II.3.4.2.2 Le modèle différentiel [BUR 82]	58
II.3.4.2.3 Le modèle prédictif [TAS 92]	58
II.4 Expériences de rééducation par ordinateur	59
II.4.1 Introduction	59
II.4.2 Compréhension orale	59
II.4.3 Production orale	60
II.4.4 Compréhension écrite	60
II.4.5 Production écrite	60
II.4.6 Dénomination d'images	61
II.4.7 Genre grammatical	61
II.4.8 Conclusion	62
II.5 Conclusion	63
Chapitre III LES TROUBLES DU CALCUL ET DU TRAITEMENT DES NOMBRES	65
III.1 Historique	65
III.1.1 Introduction	65
III.1.2 Approche anatomo-clinique	66
III.1.3 Approche cognitive	67
III.2 Représentations écrites des nombres	67
III.2.1 Un panel étendu de représentations	67
III.2.2 Un nombre limité de signes quel que soit la représentation employée	67
III.2.3 Vers une représentation positionnelle	68
III.2.3.1 La représentation hiéroglyphique	68
III.2.3.2 Le système à chiffres Arabes : un système positionnel	68
III.2.4 Les mots-nombres, pour une expression verbale du nombre	69
III.3 Organisation linguistique du Système français de numération verbale	69
III.3.1 Préambule	69
III.3.2 Le système chinois : un modèle de simplicité et de régularité	69
III.3.3 Le lexique des mots-nombres français	70
III.3.3.1 Généralités	70
III.3.3.2 Organisation du lexique	70
III.3.3.2.1 En piles lexicales	70
III.3.3.2.2 D'après le rôle sémantique des mots-nombres	72
III.3.3.3 Pourquoi le système français est-il irrégulier ?	73
III.3.4 Règles d'organisation des mots-nombres	73
III.3.4.1 Des structures additives et multiplicatives	73
III.3.4.2 Association suivant l'appartenance à une pile lexicale	74
III.3.4.2.1 Des règles syntaxiques d'acceptation et de rejet	74
III.3.4.2.2 Algorithme de traitement	74
III.3.4.2.3 Les groupes de règles	75
III.3.4.3 Associations selon le rôle sémantique des mots-nombres	75
III.3.4.4 Remplissage d'une grille syntaxique pré-établie	76
III.4 Architectures cognitives des processus de calcul et de traitement des nombres	77
III.4.1 Le cérébro-lésé source d'observation	77
III.4.2 Le modèle de McCloskey et Caramazza et coll.	78
III.4.2.1 Introduction	78
III.4.2.2 Le traitement des nombres	78
III.4.2.2.1 La compréhension des nombres	78
III.4.2.2.2 La production des nombres	79
III.4.2.3 Le système de calcul	79
III.4.2.4 Conclusion	79
III.4.3 L'architecture de Deloche et Seron pour le traitement des nombres	80
III.4.3.1 Introduction	80
III.4.3.2 Une architecture asémantique	80
III.4.3.3 Algorithmes de transcodage [DEL 87 b]	81
III.4.3.3.1 Découper les nombres en paquets de trois chiffres	81

III.4.3.3.2	Algorithme de transcodage alphabétique / arabe	81
III.4.3.3.3	Algorithme de transcodage arabe / alphabétique	83
III.4.3.4	Conclusion	84
III.4.4	Le modèle de Campbell et Clark	85
III.4.5	Le modèle de Dehaene et Cohen	85
III.4.5.1	Deux types de représentations : exacte et approximative	85
III.4.5.2	Le modèle triple code	87
III.4.6	Conclusion	87
III.5	L'apprentissage de la série des mots-nombres	88
III.5.1	Quand effectuer cet apprentissage ?	88
III.5.2	Découpage des apprentissages	88
III.5.3	Conséquences liées au concept et à l'irrégularité des mots-nombres	89
III.6	Rééducations expérimentales du traitement des nombres chez le cérébro-lésé	90
III.6.1	Introduction	90
III.6.2	Méthode de rééducation du transcodage des mots-nombres en chiffres [DEL 87a]	90
III.6.3	Méthode de rééducation du transcodage des chiffres en mots-nombres	90
III.6.4	Déroulement des séances de rééducation et progression du patient	91
III.6.5	Expérimentation chez l'aphasique acalculique	92
III.6.5.1	Programmes de Ternon et Martigny [TER 87]	92
III.6.5.1.1	Présentation	92
III.6.5.1.2	Résultats	92
III.6.5.2	Programmes de Ferrand [FER 90]	93
III.6.5.2.1	Présentation	93
III.6.5.2.2	Résultats	93
III.6.6	Expérimentation chez l'adolescent en difficulté [FER 90]	94
III.6.6.1	Présentation	94
III.6.6.2	Résultats	94
III.7	Conclusion	94
Chapitre 4	LE SYSTEME L.A.R.A.	97
IV.1	Introduction	97
IV.2	Objectifs	99
IV.3	Architecture générale de L.A.R.A.	101
IV.3.1	Présentation	101
IV.3.2	Un outil au service du thérapeute	102
IV.3.3	Un outil au service du malade	102
IV.4	Description d'un tuteur	104
IV.4.1	Présentation	104
IV.4.2	Le modèle du domaine	105
IV.4.3	Le modèle du malade	105
IV.4.4	Le pédagogue	106
IV.4.4.1	Généralités	106
IV.4.4.2	Session d'évaluation	107
IV.4.4.3	Session de rééducation	107
IV.4.4.4	Aide apportée au malade en rééducation	108
IV.4.5	Le générateur d'items	111
IV.5	L'Interface Homme/Machine de L.A.R.A.	113
IV.5.1	Présentation	113
IV.5.2	Communication thérapeute-machine	114
IV.5.2.1	Parcours de menus	114
IV.5.2.2	Exploitation des performances des malades	115
IV.5.2.2.1	Sous L.A.R.A.	115
IV.5.2.2.2	Sous Microsoft Excel	117
IV.5.3	Communication malade-machine	117
IV.5.3.1	L'I.H.M. en jugement	120
IV.5.3.2	L'I.H.M. en production	121
IV.5.4	Mise en oeuvre de l'I.H.M. de L.A.R.A.	123

IV.5.4.1	Présentation	123
IV.5.4.2	La boîte à outils	123
IV.5.4.3	La gestion des menus.....	124
IV.5.4.3.1	Contenu d'un menu	124
IV.5.4.3.2	Corps d'un menu	124
IV.5.4.3.3	Gestion des menus	125
IV.5.4.3.4	Adaptabilité et maintenance.....	125
IV.5.4.3.5	Perspectives	127
IV.5.4.4	Les tuteurs : une gestion de l'I.H.M. par règles de production	127
IV.6	Domaines d'application actuellement mis en oeuvre.....	128
IV.6.1	Introduction	128
IV.6.2	Jugement et production de suites de formes géométriques.....	129
IV.6.2.1	Présentation	129
IV.6.2.2	Jugement de suites	129
IV.6.2.3	Production de suites.....	131
IV.6.3	Jugement et production de mots-nombres	131
IV.6.3.1	Présentation	131
IV.6.3.2	Jugement mot-nombre / non mot-nombre	132
IV.6.3.3	Jugement de suites de mots-nombres.....	132
IV.6.3.4	Production de suites de mots-nombres	133
IV.7	Conclusion.....	133

Chapitre 5 EVALUATION DE L'APTITUDE DES MALADES A UTILISER LE SYSTEME

L.A.R.A.	135
V.1	Présentation.....	135
V.2	Population d'étude.....	135
V.3	Matériel informatique utilisé	137
V.4	Outils statistiques.....	137
V.5	Evaluation de l'aptitude à utiliser la souris	138
V.5.1	Introduction.....	138
V.5.2	Protocole.....	138
V.5.3	Index de difficulté.....	139
V.5.4	Résultats.....	140
V.5.4.1	Analyse descriptive.....	140
V.5.4.2	Analyse statistique	141
V.5.4.2.1	Performances globales	141
V.5.4.2.2	Déplacements suivant un axe	141
V.5.4.2.3	Déplacements suivant les deux axes	143
V.5.5	Discussion	144
V.6	Evaluation de l'aptitude à utiliser l'I.H.M. de L.A.R.A.....	145
V.6.1	Présentation.....	145
V.6.2	Epreuves de jugement	145
V.6.2.1	Décision mot-nombre/non(mot-nombre)	145
V.6.2.1.1	Introduction.....	145
V.6.2.1.2	Résultats	146
V.6.2.1.2.1	Analyse descriptive	146
V.6.2.1.2.2	Analyse statistique.....	147
V.6.2.1.2.2.1	Temps de réponse.....	147
V.6.2.1.2.2.2	Qualité des réponses	147
V.6.2.1.3	Discussion	147
V.6.2.2	Jugement de suites	148
V.6.2.2.1	Introduction.....	148
V.6.2.2.2	Résultats	148
V.6.2.2.2.1	Analyse descriptive	148
V.6.2.2.2.2	Analyse statistique.....	150
V.6.2.2.2.2.1	Temps de réponse.....	150
V.6.2.2.2.2.2	Qualité des réponses	152

V.6.2.2.3 Discussion	153
V.6.2.3 Hiérarchisation de suites	154
V.6.2.3.1 Introduction	154
V.6.2.3.2 Résultats	155
V.6.2.3.2.1 Analyse descriptive	155
V.6.2.3.2.2 Analyse statistique.....	157
V.6.2.3.2.2.1 Temps de réponse du premier choix.....	158
V.6.2.3.2.2.2 Temps de réponse total.....	159
V.6.2.3.2.2.3 Qualité des réponses	160
V.6.2.3.3 Discussion	162
V.7 Discussion Générale et Conclusion	162
 CONCLUSION GENERALE	 167
 REFERENCES	 171
 Annexe A L'APPRENTISSAGE	 183
A.1 Introduction	183
A.2 Qu'est ce que l'apprentissage ?.....	184
A.3 Apprentissage et mémoire	185
A.4 Les théories de l'apprentissage.....	185
A.4.1 Les théories stimulus-réponse ou Behaviorisme.....	185
A.4.1.1 Le behaviorisme : une science	185
A.4.1.2 A un stimulus correspond une réponse	186
A.4.1.3 Apprentissage et performance.....	186
A.4.1.4 Les conséquences d'une réponse.....	187
A.4.1.4.1 La loi de l'effet	187
A.4.1.4.2 L'apprentissage par essais et erreurs.....	187
A.4.1.5 Entre S et R, il y a un organisme.....	187
A.4.1.6 Le conditionnement opérant	188
A.4.1.6.1 L'organisme ne subit pas, il agit.....	188
A.4.1.6.2 Le renforcement	188
A.4.1.6.3 Programmes de renforcement Skinnériens.....	189
A.4.1.6.4 L'enseignement programmé	189
A.4.1.7 Conclusion	190
A.4.2 Les théories cognitivistes	190
A.4.2.1 Présentation.....	190
A.4.2.2 L'apprentissage latent.....	191
A.4.2.3 L'apprentissage par imitation	192
A.4.2.4 Les bases de la théorie piagétienne	192
A.4.2.4.1 Les structures piagésiennes (schèmes)	192
A.4.2.4.2 Les stades de développement chez l'enfant.....	193
A.4.2.4.3 Epistémologie, biologie, logique et mathématiques.....	193
A.4.2.4.3.1 L'épistémologie	193
A.4.2.4.3.2 La biologie	194
A.4.2.4.3.3 La logique et les mathématiques	194
A.4.2.5 Conclusion	194
A.5 La pédagogie.....	195
A.5.1 Introduction.....	195
A.5.2 Différencier les enseignements	196
A.5.2.1 La pédagogie différenciée.....	196
A.5.2.2 Individualiser les apprentissages.....	196
A.5.2.3 Adapter l'enseignement aux élèves	197
A.5.3 Comment apprend-on?.....	197
A.5.3.1 Le rôle de l'acquis	197
A.5.3.2. Relation entre acquis et erreur [PERR 94].....	198

A.5.3.3 Rôle des représentations mentales [GAR 82]	198
A.5.3.3.1 Le geste d'attention.....	198
A.5.3.3.2 Le geste de réflexion	199
A.5.3.3.3 Le geste de mémorisation.....	199
A.5.4 Méthodes pédagogiques.....	199
A.5.4.1 Les composantes d'une méthode pédagogique.....	199
A.5.4.2 Exemples de méthodes pédagogiques.....	200
A.5.4.2.1 Présentation.....	200
A.5.4.2.2 L'apprentissage par expérience	200
A.5.4.2.2.1 L'apprentissage par essais et erreurs.....	201
A.5.4.2.2.2 La pédagogie expérientielle	201
A.5.4.2.3 L'apprentissage socratique	202
A.5.4.2.4 La pédagogie par objectifs (P.P.O.)	202
A.5.5 L'évaluation des apprenants [ALL 91].....	204
A.5.5.1 L'évaluation sommative	204
A.5.5.2 L'évaluation formative	204
A.5.5.3 Evaluation formative préparant l'évaluation sommative.....	205
A.5.5.4 Evaluation formative greffée sur une évaluation sommative.....	205
A.5.6 Conclusion	206
A.6 Conclusion de l'Annexe A	206
Annexe B L'ENSEIGNEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR	207
B.1 Introduction.....	207
B.2 Les objectifs de l'E.A.O.	208
B.2.1 Un outil pour le formateur	208
B.2.2 Un outil pour l'apprenant	208
B.2.2.1 A l'école.....	208
B.2.2.2 En formation continue sur son lieu de travail.....	209
B.2.2.3 Un moyen de rééducation.....	210
B.2.3 Les objectifs pédagogiques de l'E.A.O.	210
B.3 Les catégories de logiciel d'enseignement	211
B.3.1 Définition d'un didacticiel.....	211
B.3.2 Les différents types de didacticiels	212
B.3.2.1 Généralités.....	212
B.3.2.2 Les didacticiels informatifs	212
B.3.2.3 Les didacticiels de test.....	214
B.3.2.3.1 Les Questionnaires à Choix Multiple	214
B.3.2.3.2 Les Questionnaires à trous ou à réponse ouverte	215
B.3.2.4 Les didacticiels d'exercice ou d'entraînement	216
B.3.2.5 Les didacticiels de simulation	216
B.3.2.6 Les tuteurs	218
B.3.2.7 Les pédagogiques	219
B.3.2.8 Les jeux éducatifs.....	219
B.4 Les outils de création de didacticiels	220
B.4. 1 Introduction.....	220
B.4.2 Les langages auteurs	220
B.4.3 Les systèmes auteurs	221
B.4.4 Conclusion	222
B. 5 Les défauts et limites de l'E.A.O.	222
B.6 Conclusion de l'Annexe B.....	224
Annexe C L'E.I.A.O. : L'ENSEIGNEMENT INTELLIGEMMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR ..	225
C.1 Introduction.....	225
C.2 Les principaux systèmes d'E.I.A.O.	226
C.3 Les apports de l'Intelligence Artificielle à l'E.A.O.	227
C.3.1 l'Intelligence Artificielle.....	227
C.3.2 Représentation des connaissances et raisonnement en Intelligence Artificielle.....	228

C.3.2.1 Introduction	238
C.3.2.2 La représentation des connaissances	229
C.3.2.2.1 Représentation procédurale	229
C.3.2.2.2 Les règles de production	230
C.3.2.2.3 Les représentations logiques	230
C.3.2.2.4 Les réseaux sémantiques	230
C.3.2.2.5 Les frames et objets structurés	231
C.3.2.2.6 Les réseaux de contraintes	231
C.3.2.2.7 Les listes	232
C.3.2.2.8 Une approche connexionniste : les réseaux neuronaux	232
C.3.2.2.9 Les systèmes utilisant des connaissances diverses	233
C.3.2.3 Le raisonnement en Intelligence Artificielle [HAT 91]	234
C.3.3 les Systèmes Experts	235
C.3.3.1 définition	235
C.3.3.2 Les composantes d'un Système Expert	235
C.3.3.2.1 La base de connaissance	236
C.3.3.2.2 Le moteur d'inférence	236
C.3.3.3. Systèmes Experts et pédagogie	237
C.4 Les Tuteurs Intelligents	238
C.4.1 Définition et objectifs des Tuteurs Intelligents	238
C.4.2 La structure générale d'un tuteur intelligent	239
C.4.3 Les principales structures de tuteurs intelligents existantes	239
C.4.3.1 Introduction	239
C.4.3.2 Exemples de structures de Tuteurs Intelligents	240
C.4.3.2.1 L'architecture d'Anderson et Reiser	240
C.4.3.2.2 L'architecture de Hartley et Sleeman	241
C.4.3.2.3 L'architecture d'O'Shea	242
C.4.4 Les composantes d'un Tuteur Intelligent	243
C.4.4.1 Introduction	243
C.4.4.2 Le module expert	243
C.4.4.3 Le module élève	244
C.4.4.4 Le module pédagogique	245
C.4.4.5 Le module de communication Homme / Machine	246
C.5 Conclusion de l'Annexe C	248

INTRODUCTION GENERALE

L'enseignement est une des préoccupations majeures de nos dirigeants. Nous ne pouvons que nous en féliciter, car c'est pour le plus grand bien de nos chères têtes blondes. Plus généralement, au terme enseignement, nous préférons utiliser le terme formation, plus à propos. On parle ainsi de formation initiale concernant les jeunes et de formation continue ou professionnelle lorsqu'il s'agit, en entreprise, d'actualiser les connaissances du personnel voire sa reconversion.

Lorsque l'on tente de pallier un déficit ou de restituer des capacités, la formation s'appelle alors rééducation. Nous ne nous étendrons pas sur la rééducation fonctionnelle, la récupération des séquelles physiques est en effet parfaitement maîtrisée par les kinésithérapeutes. Par contre, ce qui nous intéresse au plus haut point, c'est la rééducation des troubles cognitifs, et plus particulièrement la rééducation des troubles du langage. Lors de cette étude, nous nous intéresserons à l'évaluation et à la rééducation des troubles acquis du langage, consécutifs à une lésion cérébrale. Ces troubles sont regroupés sous le terme d'aphasie, et nous n'envisagerons que le cas des adultes, sans évoquer l'aphasie de l'enfant.

L'utilisation de moyens informatiques pour apporter une aide à l'apprentissage a favorisé le développement d'une nouvelle discipline : l'enseignement assisté par ordinateur (E.A.O.). La partie n'était pourtant pas gagnée d'avance et il fallait faire face à de nombreuses difficultés pour :

- représenter les connaissances de l'expert dans des domaines complexes,
- expliquer à l'apprenant les raisonnements à appliquer ou utilisés par le système,
- individualiser l'enseignement à l'élève en tenant compte de son profil et de la compréhension de ses démarches,
- établir un dialogue convivial entre le système et l'apprenant.

Il y a une quinzaine d'années maintenant, l'introduction de techniques d'intelligence artificielle à ces systèmes leur a ouvert de nouveaux horizons. L'E.A.O. est devenu E.I.A.O. (Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur) dans le but de remédier aux difficultés évoquées ci-dessus et les produits éducatifs qui en sont issus sont devenus des "tuteurs intelligents".

Un tuteur intelligent est généralement focalisé sur ces quatre points qui sont du ressort soit d'experts du domaine d'application, soit d'experts en sciences cognitives (Psychologie Cognitive, Sciences de l'éducation, Intelligence Artificielle), et une condition revient comme un leitmotiv : adapter l'enseignement à l'apprenant. Adapter signifie faire un enseignement à la carte. C'est différencier, individualiser l'apprentissage en fonction des besoins de chacun des apprenants confrontés au système.

Il en va de même dans un système informatisé d'évaluation et de rééducation des troubles cognitifs apparaissant chez les patients cérébro-lésés atteints ou non d'aphasie. Cette adaptation des épreuves aux malades passe par une étape préalable de diagnostic des troubles constatés et de représentation très précise des connaissances préservées et altérées du malade. L'adaptation du programme thérapeutique passe également par la réalisation d'une communication soignée entre une machine et un être humain qui peut présenter des troubles perceptifs, cognitifs et moteurs très diversifiés.

Si le but (apporter des connaissances) et les constituants (expert du domaine, pédagogue, modèle de l'élève et interface homme-machine) d'un tuteur intelligent et d'un système d'évaluation et de rééducation assistées par ordinateur sont identiques, il existe cependant des différences importantes dans leur matérialisation en raison de la particularité du public auquel s'adresse chacun de ces systèmes : l'un est sain et l'autre est pathologique.

C'est précisément à l'adaptation d'un tuteur intelligent à l'évaluation et à la rééducation de personnes cérébro-lésées, et plus particulièrement à la faisabilité d'un tel outil de travail ainsi qu'à l'interaction patient-machine de ces systèmes à l'usage de personnes cérébro-lésées que nous nous sommes intéressés.

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Centre d'Automatique de l'Université des Sciences et Technologies de Lille. En collaboration avec Monsieur Gérard DELOCHE (Hôpital Pitié-Salpêtrière, Paris) et le Docteur Olivier GODEFROY (Service de Neurologie, C.H.R. de Lille), nous avons bâti le système L.A.R.A. (Logiciel d'Aide à la Rééducation des Aphasiques). L.A.R.A. présente une structure proche de celle d'un tuteur intelligent. Les exercices qui le composent à l'heure actuelle font appel à un mode d'interaction devenu aujourd'hui très populaire : les interfaces graphiques.

La communication avec des personnes cérébro-lésées, qu'elle soit verbale ou non-verbale, pose souvent des problèmes. Le but de l'étude présentée dans ce mémoire, fut

d'observer le comportement de patients atteints de lésions cérébrales à deux niveaux : d'une part vis-à-vis des épreuves qui ont été intégrées dans le système L.A.R.A. et d'autre part vis-à-vis du mode d'interaction patient-machine que nous avons adopté dans ce système d'évaluation et de rééducation.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré aux troubles du langage et à leur rééducation.

Le deuxième chapitre expose les caractéristiques des différents modules qui composent un système d'évaluation et de rééducation à l'usage de personnes cérébro-lésées. Dans cette description, nous avons consacré une part importante à l'étude des moyens utilisables pour la réalisation de l'interface homme-machine. L'interface homme-machine d'un tel système s'adresse en effet à des personnes pour lesquelles existent des désorganisations du langage. Il s'agit donc d'établir un compromis permettant de communiquer avec le malade d'une façon cohérente tout en lui proposant un programme thérapeutique adapté concernant des activités langagières perturbées. La fin de ce chapitre est consacrée à la présentation de programmes de rééducation qui ont fait appel à un micro-ordinateur.

Le troisième chapitre aborde les troubles du calcul et du traitement des nombres. Le fonctionnement du langage est trop complexe et surtout trop inconnu encore pour pouvoir être décrit. Les nombres constituent un domaine formel qui peut être plus facilement modélisé. Nous présentons ici les quatre modèles cognitifs les plus aboutis en la matière, suivis de la description de méthodes expérimentales de rééducation du traitement des nombres.

Le quatrième chapitre décrit le système L.A.R.A.. Nous développons tout d'abord l'ensemble des caractéristiques de ce système, et ici encore, l'interface homme-machine est largement détaillée. Nous présentons ensuite les domaines d'application actuellement mis en œuvre. Il s'agit d'épreuves pour lesquelles il est demandé aux malades de juger de l'apparence de suites ou de produire des suites constituées de mots-nombres (i.e. les nombres en lettres : "deux cent trente"), ou de formes géométriques de différentes tailles.

Le cinquième chapitre constitue l'évaluation de l'outil auprès des malades. Nous y présentons les résultats du comportement des patients en comparaison avec les résultats d'un groupe témoin composé de personnes saines. L'évaluation a porté sur l'aptitude des malades à

utiliser une souris, à manipuler les interfaces utilisateur graphiques de L.A.R.A. pour l'une et l'autre des épreuves (jugement, production) et pour chacun des domaines d'application (mots-nombres, symboles graphiques).

En marge de ces cinq chapitres, trois chapitres annexes présentent l'état de l'art en matière d'apprentissage et de pédagogie (Annexe A) et d'enseignement assisté par ordinateur (Annexe B : E.A.O., Annexe C : E.I.A.O.).

Chapitre I

LES TROUBLES DU LANGAGE ET LEUR REEDUCATION

I.1 Introduction

Les lésions cérébrales, dues principalement à un problème de vascularisation du cerveau, sont une des plus importantes causes de mortalité dans nos contrées. Signe encourageant, cette mortalité diminue, mais en contrepartie, les lésions cérébrales laissent des séquelles physiques, cognitives et psychologiques chez la majorité des personnes qui en sont victimes [BOG 93]. La rééducation fonctionnelle sait parfaitement s'occuper des séquelles physiques. Par contre, la rééducation des séquelles cognitives, et plus particulièrement la rééducation des troubles du langage acquis (aphasie) a longtemps été délaissée par la recherche fondamentale dont les intérêts étaient plutôt axés sur la localisation cérébrale des fonctions supérieures et divisée entre partisans d'un fonctionnement modulariste et partisans d'un fonctionnement connexionniste du cerveau. Discipline récente d'à peine un demi-siècle d'existence, la rééducation des troubles du langage a dans un premier temps connu une période empirique faute de théories. Avec l'arrivée du courant cognitif en neuropsychologie, les choses ont évolué. En étudiant les troubles sélectifs engendrés par l'aphasie, les chercheurs tentent aujourd'hui de comprendre comment fonctionne le système le plus complexe qui soit : le cerveau, et tentent d'apporter un cadre théorique à la rééducation des troubles cognitifs des personnes cérébro-lésées.

Après avoir présenté brièvement les bases de la localisation des aires cérébrales du langage, nous nous étendrons plus longuement sur les principaux troubles acquis du langage et sur les courants rencontrés en rééducation. Ensuite, nous évoquerons différentes tentatives de rééducation réalisées par l'intermédiaire de l'ordinateur, qui apparaît comme un outil prometteur en rééducation [PARTZ 94].

I.2 La neuropsychologie

I.2.1 Présentation

La neuropsychologie est la discipline qui se consacre à l'étude des perturbations créées par la lésion du cerveau (déficits cognitifs des patients cérébro-lésés). C'est une discipline scientifique récente qui comprend plusieurs courants de base dont : la théorie des localisations cérébrales, la théorie associationniste ou la théorie globaliste [POR 78].

I.2.2. Localisation et latéralisation des fonctions du langage

En 1861, Broca montra que l'atteinte d'une certaine région du cortex cérébral (située au niveau de l'hémisphère gauche dans la troisième circonvolution frontale) entraînait de graves perturbations du langage qu'il baptisa *aphémie*. Cette constatation qui permit d'établir un lien entre un déficit spécifique du langage (perte de la parole) et la localisation d'une lésion cérébrale (lobe frontal) fut effectuée chez un patient surnommé "Tan" (c'était un des seuls sons qu'il était capable de prononcer) [ROS 89].

Quelques années plus tard, en 1874, Carl Wernicke montra que la lésion d'une autre partie du cortex de l'hémisphère gauche, (première circonvolution temporale) entraînait un déficit de la compréhension verbale et une fluence des propos oraux [HEC 72]. A l'aire de Broca (déficit moteur) vint s'ajouter un second centre du langage (déficit sensoriel) situé dans une région plus postérieure (cf. Figure I.1). Wernicke déduisit également qu'il existait une troisième forme d'aphasie (aphasie de conduction) correspondant à la destruction des voies qui conduisent d'un centre du langage à l'autre. Broca et Wernicke avaient aussi découvert le phénomène de dominance cérébrale : pour plus de 90% des droitiers et pour les deux tiers des gauchers, les structures du langage sont localisées dans l'hémisphère gauche [DAM 92].

Transposées à la question du langage, les données expérimentales recueillies montraient que plusieurs centres de fonctions élémentaires du langage situés dans des aires cérébrales déterminées verbale (associationnisme) et que par conséquent, la destruction de tel ou tel d'entre eux entraînait un déficit de nature correspondante [MAZ 84].

La tendance fut alors de définir des formes pures de déficits auxquels on associait des localisations très précises. La conséquence fut l'établissement de classifications de plus en plus complexes comprenant des formes pures et dissociées de troubles du langage et non pas une altération du langage dans ses différentes modalités [CAZ 77].

Les corrélations anatomo-cliniques ont bien entendu considérablement évolué, en particulier avec l'apport du scanner : extension de la "zone du langage" classique et discordances entre les localisations lésionnelles visualisées par le scanner et la sémiologie aphasique. Ainsi, pour une même sémiologie verbale on retrouve des localisations lésionnelles différentes et pour des localisations lésionnelles identiques on retrouve des sémiologies verbales différentes [GEL 88].

I.2.3 La neuropsychologie cognitive

La neuropsychologie cognitive est une discipline pluridisciplinaire, "une science qui tente d'établir des ponts entre les neurosciences (neuroanatomie, neurophysiologie,

neurochimie) et les sciences cognitives (psychologie cognitive, intelligence artificielle, linguistique)" [SER 94a]. Le but de cette collaboration est d'**analyser les troubles des fonctions cognitives humaines qui résultent d'une atteinte cérébrale pour déterminer l'organisation et la logique du fonctionnement cognitif normal**, pour tenter d'apporter une réponse à la question : "Comment fonctionne le cerveau ?" [McCAR 94].

Question à laquelle il est très difficile de répondre, sinon partiellement, malgré la disponibilité d'outils très performants d'imagerie médicale (Tomographie par Emission de Positons et Résonance Magnétique Nucléaire) et de modèles cognitifs de plus en plus élaborés. Le cerveau humain est en effet reconnu à juste titre comme étant le système le plus complexe de l'univers : il contient mille milliards de cellules, dont cent milliards sont des neurones constitués en réseaux qui règlent l'intelligence, la créativité, l'émotivité, la conscience et la mémoire [FIS 92].

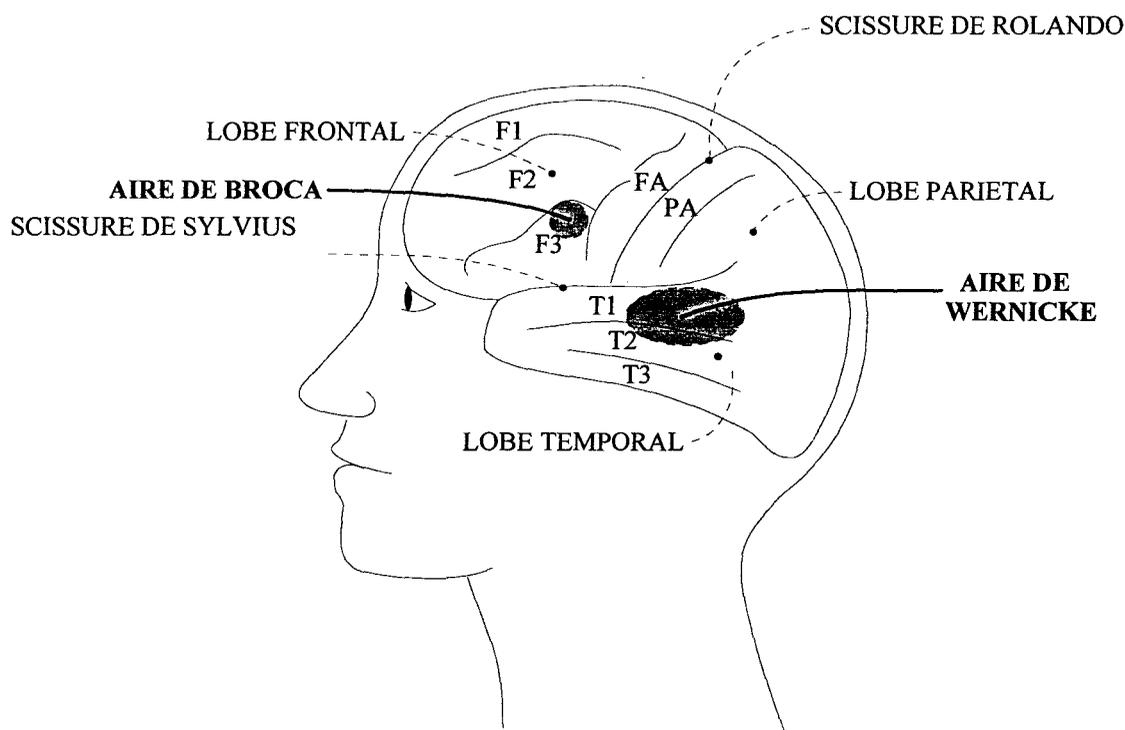


Figure I.1 : La zone du langage

I.3 Les troubles du langage acquis : l'aphasie

I.3.1 L'aphasie

L'aphasie est un trouble du langage qui apparaît suite à une lésion cérébrale relativement bien délimitée de la partie centrale de l'hémisphère gauche. La désintégration ou la désorganisation du langage acquis peut se situer au niveau de sa compréhension et/ou au niveau de sa réalisation extérieure sous ses deux formes : parlée et écrite. L'aphasie affecte

d'ailleurs généralement simultanément ou successivement plusieurs activités du langage, débouchant sur des tableaux cliniques distincts. Ainsi, d'un auteur à l'autre les symptômes pris en compte, le regroupement de ceux-ci en syndromes et leurs appellations varient énormément [LEC 82].

L'aphasie ne couvre pas tous les troubles qui perturbent l'émission et la compréhension du langage. On la distinguera généralement des troubles liés à des lésions des organes récepteurs ou effecteurs ainsi que des troubles du langage observés chez les déments (on assiste alors à une réorganisation du langage et non à une désorganisation [HEC 72]) et des troubles du développement du langage de l'enfant (aphasie de l'enfant ou développementale consécutive à une lésion cérébrale chez un enfant pour lequel il existe un langage acquis au moins partiellement) [CAZ 77].

I.3.2 Avertissement

Au vu de ceci, l'aphasie "n'est pas une". Dans ces conditions, établir une taxonomie des différentes aphasies est une gageure, d'autant que pour un même tableau clinique, les sites lésionnels peuvent être différents [DEM 94]. La description des principaux troubles rencontrés chez les malades faite ci-dessous n'est donc d'aucune manière exhaustive et normalisée. **Elle permettra au lecteur non spécialiste de se faire une idée des principaux symptômes que l'on peut rencontrer chez le malade et dont nous devons tenir compte lors de la réalisation d'épreuves d'évaluation qui lui sont destinées.**

La partie suivante qui rassemble des symptômes en catégories cliniques ne fait pas plus l'unanimité. Nous n'y parlons pas de troubles purs proprement dits, mais de formes (aphasie de Broca appelée aussi aphasie motrice ou motrice corticale ou d'expression, etc., aphasie de Wernicke) qui correspondent à des regroupements de symptômes que l'on rencontre de façon distincte et plus sévère dans les troubles purs (surdité verbale, cécité verbale, anarthrie, agraphie).

La gravité des symptômes constatés est aussi différente d'un patient à un autre. Les formes classiques sont adéquates pour rendre compte des principaux tableaux cliniques dans lesquels s'incarne l'aphasie, mais s'avèrent insuffisantes pour caractériser précisément le comportement verbal du patient [LEC 82]. Pour une même forme générale, on distinguera donc une aphasie de Wernicke proprement dite, d'une aphasie de Wernicke avec prédominance des troubles du langage écrit ou d'une aphasie de conduction... C'est donc avec les réserves d'usage que nous présentons ces formes cliniques. Les références que nous pourrions faire par la suite à l'une ou l'autre d'entre elles seront basées sur le caractère dominant du trouble constaté chez le patient, ou sur celui qui influe sur le comportement du patient dans une situation langag re donnée.

I.3.3 Troubles du langage oral

I.3.3.1 Troubles de l'expression verbale (anarthrie)

I.3.3.1.1 Troubles articulatoires

Les troubles arthritiques (**désintégration phonétique, anarthrie**) vont dans le sens d'une simplification de la réalisation et sont caractérisés par :

- une émission laborieuse du langage,
- une modification du débit plus lent que la normale,
- des accentuations erronées.

Dans tous les cas, le malade est conscient du caractère anormal de sa production phonétique.

I.3.3.1.2 Troubles de la réduction du langage

Les **stéréotypies verbales** consistent en une désintégration du langage qui se moule sur un cadre invariable, restrictif et fréquemment itératif.

L'**agrammatisme** est un désordre qui porte sur le maniement de la grammaire. Il est caractérisé par un ralentissement du débit, une réduction du vocabulaire disponible, une réduction en nombre et en simplification des structures syntaxiques disponibles [LEC 79]. Dans les formes les plus sévères de réduction du langage la phrase est réduite à son squelette, dans un style télégraphique : suppression des prépositions, verbes à l'infinitif, etc. [POR 78]. L'agrammatisme est à différencier des dyssyntaxies (cf. I.3.3.1.3) pour lesquelles on observe des altérations de l'organisation syntaxique.

Le **manque du mot** peut se rencontrer aussi bien dans des situations de langage provoqué (désignation d'objets ou d'images, épreuves verbales, etc.) que dans des situations de langage spontané. Il consiste en une difficulté et plus souvent en une impossibilité pour le malade de produire le mot adéquat à l'activité linguistique en cours [MAZ 84]. Le manque du mot peut être plus ou moins important selon que le mot est abstrait ou concret, fréquemment utilisé ou non, ou selon sa catégorie lexicale ou grammaticale. Le manque du mot n'est pas une réduction systématique du langage, il peut avoir lieu dans des activités bien spécifiques (ex : dénomination) alors que la compréhension, la lecture et l'écriture sous dictée sont normales.

Le manque du mot est caractéristique de toutes les formes d'aphasie et peut se manifester sous différentes formes selon les activités et de façon sélective.

I.3.3.1.3 Les dyssyntaxies (paragrammatisme)

Les dyssyntaxies sont à différencier de l'agrammatisme : les formes grammaticales ne sont pas simplifiées mais utilisées de façon anormale (ex : "elle portait une galette *sur* sa grand-mère" au lieu de "elle portait une galette *chez* sa grand-mère. D'après [LEC 79]).

I.3.3.1.4 Les paraphasies

Les paraphasies sont des déformations (ajouts, suppressions, déplacements) ou des substitutions qui portent sur les mots de façon intense et étendue et qui sont accompagnées de troubles syntaxiques [LEC 79, VALD 94] :

- Utilisation d'un mot pour un autre :
 - avec rapport **conceptuel** ou sémantique (hélicoptère pour avion, bon pour mauvais),
 - avec rapport **phonémique** (table pour sable),
 - sans rapport conceptuel ou phonémique (fourchette pour chien).
- Création de néologismes qui peuvent ne pas avoir de rapport apparent avec le mot.

Dans les formes de paraphasies les plus sévères il y a même constitution d'un jargon.

I.3.3.1.5 La jargonaphasie

La jargonaphasie se particularise par une désintégration des valeurs sémantiques du langage. Le langage émis est totalement incompréhensible et le malade n'a pas conscience du caractère anormal de ce qu'il dit, de la désorganisation de son langage.

Ce langage dénué de sens est produit avec aisance voire rapidement de façon logorrhéique avec conservation de l'intonation. Le sujet l'accompagne souvent d'une excitation psychomotrice (prolixité gestuelle).

Il existe trois types principaux de jargon [POR 78] :

- les **jargons différenciés** formés de phonèmes très divers groupés sans règle et sans signification,
- les **jargons asémantiques** constitués de néologismes (sans doute par manque du mot) assemblés selon une apparente organisation syntaxique,
- les **jargons paraphasiques** dans lesquels le sujet substitue des mots à d'autres sans aucune raison et de façon permanente donnant l'impression d'une incohérence de la pensée.

I.3.3.2 Troubles de la compréhension verbale (surdité verbale)

Au contraire des troubles de l'expression orale et de leur matérialisation, l'étude des troubles de la compréhension verbale est plus difficile à réaliser et ne peut que se limiter à ce que le sujet comprend ou ne comprend pas, en fonction de son état de fatigue et du temps qui lui est laissé pour comprendre le message [LEC 79].

L'examineur déduit ces troubles à partir des comportements et des réponses du malade à un message oral correspondant à [POR 78] :

- de simples conversations,
- des désignations orales d'objets ou d'images,
- la vérification de la conservation du signifiant et du signifié,
- l'exécution d'ordres simples ou complexes...

Le niveau d'appréhension peut être gradué suivant qu'il s'agit de :

- phrases toutes faites (dans une phrase, la richesse en éléments significatifs rend celle-ci plus aisément perçue que ne le serait un mot isolé),
- langage propositionnel,
- langage concret,
- langage abstrait,
- ou de plusieurs modalités.

I.3.4 Troubles du langage écrit

Un trouble du langage écrit accompagne toujours l'aphasie, il est en général plus altéré et de façon plus durable que le langage oral dans les aphasies globales [POR 78]. Une dissociation du langage oral et du langage écrit peut exister pouvant aller dans le processus de récupération, jusqu'à une restauration du langage oral quand le langage écrit reste perturbé. Cette dissociation est peut être liée au fait que le langage écrit est une activité plus complexe que le langage oral et d'apprentissage plus tardif.

I.3.4.1 Troubles de l'expression écrite (agraphie)

L'expression du langage sous sa forme écrite se fait par l'intermédiaire de l'écriture. L'agraphie étudie les aspects de sa désorganisation [POR 78] :

- les **agraphies aphasiques** découlent d'une perturbation portant sur les mécanismes propres du langage. Les caractères du graphisme sont bien conservés mais l'utilisation des symboles est troublée. On trouve les mêmes perturbations qualitatives et quantitatives que pour l'expression orale (**agraphie littérale, paragraphie, jargonographie, manque du mot**),

- les **agraphies d'aspect apraxique** sont dues à une perturbation de l'exécution motrice de l'écriture. Cette altération porte sur le graphisme et peut se traduire par un gribouillage : perturbation de l'agencement spatial des lignes, des mots et des lettres.

I.3.4.2 Troubles de la compréhension écrite (cécité verbale)

Parmi les troubles de la lecture on peut distinguer :

- les **alexies aphasiques** qui portent sur les lettres et les syllabes d'un mot. La verbalisation du mot est souvent difficile (le mot pouvant être déformé ou remplacé par une périphrase) et dissociée de sa compréhension,
- les **alexies littérales** où les lettres sont mieux reconnues isolément que les mots (et les mots que les phrases [LEC 79]), d'autant plus facilement que la morphologie est simple (i et o sont mieux reconnues que f et g), mais des confusions peuvent se produire si leur morphologie est proche (m et n) ou symétrique (b et d). La lecture est parsemée d'erreurs dues à la confusion des lettres, à la difficulté de reconstruire le mot même si les lettres ont été identifiées, à la lecture d'un mot pour un autre (**paralexie**. Cf. I.3.3.1.4 et les paraphasies) [POR 78].

I.4 Les principales formes cliniques des aphasies

I.4.1 Présentation

On distingue généralement l'aphasie en trois catégories principales pour lesquelles les lésions sont circonscrites à des zones bien spécifiques du cortex cérébral : aphasie d'expression, aphasie de compréhension et aphasie de conduction, auxquelles s'ajoutent d'autres formes dont l'aphasie mixte, combinaison des aphasie d'expression et de compréhension ou des formes résultant de lésions épargnant les aires de Broca et de Wernicke (aphasies amnésiques, transcorticales motrices et sensorielles). Cette classification est présentée comme archaïque pour certains [LEC 82] car elle introduit une hétérogénéité dans les populations qui composent ces classes trop générales. Des sous-classes apparaissent donc en fonction : du trouble dominant le tableau clinique, de sa gravité et du type d'aphasie concernée.

Cette classification se veut clinique. Il existe d'autres classifications d'ordre linguistique (Luria, Jakobson...). Dans ces classifications les différentes catégories sont alors énoncées en fonction des troubles occasionnés à l'activité langagière au niveau :

- phonétique ou phonémique : éléments du langage (trait, phonème, monème.

syntagme) et articulations entre ces éléments (niveau phonétique, phonémique et morpho-syntaxique),

- sémantique.

I.4.2 Aphasie d'expression

I.4.2.1 Tableau clinique

La forme la plus commune d'aphasie d'expression est l'**aphasie de Broca** :

- expression orale : après une phase initiale de suppression de l'expression orale, l'aphasique de Broca parle peu, présente une réduction caractéristique de la fluence verbale [DEM 94]. Il ne peut s'exprimer que par des stéréotypies ou des phrases courtes sans structure syntaxique voire limitées à un seul mot et peut évoluer vers l'agrammatisme [LEC 79, BER 80, SER 82a]. Le malade présente des troubles arthriques de désintégration phonétique importants et souffre d'un manque du mot sévère,
- compréhension orale : le malade comprend généralement bien ce qu'on lui dit mais la compréhension n'est toutefois pas intacte,
- expression écrite : l'écriture reflète en général le trouble d'expression orale, mais peut parfois être mieux conservée et permettre à certains malades de communiquer par écrit,
- compréhension écrite : la compréhension écrite est souvent plus perturbée que la compréhension orale.

IV.4.2.2 Généralités anatomiques et pronostic de récupération

L'aphasie de Broca est consécutive à des lésions frontales (aire de Broca), ou avoisinantes (cf. Fig. I.1) [DEM 94]. La récupération est lente, le langage reste longtemps pauvre, réduit, relatif au concret et agrammatique.

L'aphasie de Broca s'accompagne dans la plupart des cas d'une hémiplégié droite ou au moins d'une paralysie faciale.

I.4.3 Aphasie de compréhension

I.4.3.1 Tableau clinique

La forme la plus commune est l'**aphasie de Wernicke** souvent dominée par la présence d'un trouble de la compréhension du langage (l'aphasie de Wernicke peut revêtir trois formes différentes [LEC 79] dont une avec prédominance de l'atteinte de la langue écrite) :

- expression orale : l'expression est variable, parfois réduite, mais le plus souvent fluente et sans troubles arthriques. C'est alors une logorrhée riche et intarissable

faite d'un enchaînement de phrases toutes faites ou de phrases commencées et non terminées, mais souvent très déformées et entraînant des transformations de tous ordres (paraphasies, jargonaphasies...). Le manque du mot est sévère et persiste longtemps [MAZ 84]. On note parfois des incapacités à répéter,

- compréhension orale : le trouble de compréhension orale est très variable mais toujours présent. Une surdité verbale peut même dominer le tableau clinique lorsque ce trouble est très important [LEC 82],
- expression écrite : chez beaucoup de malades, les troubles du langage écrit sont toujours sévères et durables, souvent de façon plus intense que pour le langage oral [LEC 79],
- compréhension écrite : les troubles de la compréhension écrite sont fréquents, leur intensité varie selon les cas. Une alexie peut parfois dominer de manière très nette.

I.4.3.2 Généralités anatomiques et pronostic de récupération

Cette aphasie correspond dans la majorité des cas à des lésions temporales (aire de Wernicke) ou temporo-pariétales gauches (cf. Fig. I.1). Elle s'accompagne parfois d'une hémiparésie, mais plus souvent de troubles sensitifs et du champ visuel [MAZ 84].

Le pronostic de récupération dépend en grande partie de l'évolution des troubles de compréhension orale. Si le patient ne récupère pas ces facultés, il est peu accessible à la r ducation. Dans les autres cas, la récupération du langage courant est possible, mais le manque du mot et les troubles du langage écrit persistent souvent plusieurs années après.

Souvent le malade n'a pas conscience de son trouble (anosognosie) et s'étonne ou s'irrite de l'incompréhension de son auditeur [SER 82a].

I.4.4 Aphasie de conduction

L'aphasie de conduction se manifeste essentiellement au niveau de l'expression :

-   l'oral, le discours est fluide, accompagné de transformations phonémiques,
- l'expression écrite révèle généralement des dyssyntaxies.

Cependant, la compréhension orale et écrite est relativement normale [DEM 94].

Anatomiquement, les lésions occasionnant une aphasie de conduction se situent au niveau des liens entre aire de Broca et aire de Wernicke (partie postérieure et interne de la scissure de Sylvius , du girus supramarginalis voire du faisceau arqué [SER 82a]).

I.4.5 Aphasies mixtes et globales

Les aphasies mixtes sont la combinaison des différentes formes d'aphasies existantes.

On dit qu'une aphasie est globale lorsque l'on observe simultanément chez le patient les troubles expressifs les plus sévères de l'aphasie de Broca et les troubles réceptifs les plus sévères de l'aphasie de Wernicke [LEC 84]. L'aphasie globale affecte alors la totalité de la zone du langage [SER 82a].

Le pronostic de récupération de l'aphasique global n'est généralement pas bon et ces malades sont souvent inaccessibles à la rééducation. Lorsque la récupération est possible, une dissociation peut exister pouvant aller jusqu'à une restauration du langage oral quand le langage écrit reste perturbé.

Les lésions, centrées sur la région sylvienne, sont généralement très étendues.

I.4.6 Les principales causes d'aphasie [MAZ 84]

Les principales causes d'aphasie :

- L'accident vasculaire cérébral : un accident vasculaire cérébral (A.V.C.) est selon [BOG 93] " un déficit neurologique soudain d'origine vasculaire présumée". Tout A.V.C. a pour cause immédiate une lésion vasculaire hémorragique (rupture d'un vaisseau sanguin) ou plus généralement ischémique (réduction de l'apport sanguin résultant d'une occlusion artérielle). L'accident vasculaire cérébral est la cause la plus fréquente d'aphasie (environ 70%). Toutes les variétés se rencontrent mais surtout les aphasies de Broca et de Wernicke,
- le traumatisme crânien : il est à l'origine d'environ 15% des aphasies,
- environ 8% d'aphasies sont d'origine tumorale et 4% d'origine dégénérative ou infectieuse.

I.5 La rééducation des troubles du langage

I.5.1 Introduction [PARTZ 94]

La rééducation des troubles du langage est une discipline récente. Apparue après la deuxième guerre mondiale, la revalidation neuropsychologique suit les tendances de la psychologie moderne (behaviorisme, cognitivisme).

On assista tout d'abord à une période "empiriste" durant laquelle la rééducation fut considérée pour certains comme une stimulation, pensant que les fonctions sous-jacentes n'étaient pas perdues mais temporairement inaccessibles et pour d'autres, comme un réapprentissage de l'information manquante à effectuer à l'aide d'une procédure didactique.

Totalement dénuée de cadre théorique parce que la recherche fondamentale se désintéressait de la rééducation [SER 82a], cette approche se base sur les sémiologies présentées par les patients aphasiques [DUC 86, TIS 88].

Chez les behavioristes, on se base aussi sur les symptômes présentés par le patient pour organiser son programme thérapeutique et sur son comportement qui dépend de sa conduite en réponse aux stimuli et aux renforcements dont il bénéficie (conditionnement opérant). Les méthodes thérapeutiques découlent tout naturellement de l'enseignement programmé (cf. Annexe A).

En se tournant vers la psychologie cognitive, les neuropsychologues tentent de donner une interprétation théorique aux symptômes présentés par des malades dont l'examen clinique révèle une grande hétérogénéité. On cherche ici à proposer une thérapie axée sur les processus responsables des troubles à partir de la modélisation de leur fonctionnement cognitif plutôt qu'à proposer un ensemble de programmes spécifiques à chaque symptôme.

I.5.2 La récupération spontanée [THI 86]

La récupération spontanée consiste en l'évolution de l'aphasie sans qu'aucune intervention extérieure ne soit effectuée dans ce but. Elle peut démarrer immédiatement après le début de l'aphasie, mais elle n'est généralement appréciable qu'après les premières semaines qui suivent la lésion, soit après que le système nerveux central ait retrouvé une stabilité neurophysiologique. En cas d'évolution favorable, la récupération la plus importante se situe alors pendant les trois premiers mois qui suivent l'A.V.C.. Le niveau de récupération atteint sera dépendant de la sévérité initiale du trouble phasique présenté par le malade, et plus la lésion sera importante, plus la récupération du langage sera réduite.

Passés six mois après la lésion, les chances d'évolution favorable de l'état du patient sont faibles. Le seul moyen qui existe alors pour prolonger la revalidation fonctionnelle du patient est l'utilisation d'un programme de rééducation adapté aux troubles occasionnés par la lésion et qui subsistent après la période de récupération spontanée.

I.5.3 Un maître mot en rééducation : adapter

Les troubles aphasiques qui résultent d'une lésion cérébrale hémisphérique focale sont très divers comme nous venons de le voir. Cette altération touche les mécanismes psychophysiologiques du langage. Certains d'entre eux sont totalement perdus ou plus ou moins altérés, d'autres sont maintenus. L'utilisation d'un programme de rééducation chez un malade permet alors dans bien des cas la récupération du lourd handicap social et

psychologique que représente l'aphasie [MAZ 84]. Encore faut-il que ce programme de rééducation soit adapté au processus pathologique bien spécifique qui le touche : "Il faut d'une part reconstruire ce qui altéré, d'autre part compenser ce qui est perdu en utilisant ce qui est maintenu" [LHE 88]. Ce n'est toutefois pas suffisant car d'autres considérations entrent en jeu : il faut également adapter le programme de rééducation employé à un malade, donc à son âge, à ses habitudes professionnelles et culturelles, à sa famille, à sa personnalité, à sa motivation et au handicap physique (hémiplegie) qui accompagne souvent l'aphasie [CAS 86]. Soit une adaptation à un ensemble de variables neurologiques et médicales, psychologiques et sociologiques qui sont dépendantes les unes des autres et dont les rôles respectifs sont difficiles à établir avec précision [SER 82b].

Sans oublier l'importance que jouent les relations qui s'opèrent entre le malade et le thérapeute, principal partenaire de la rééducation, tant au niveau de l'intérêt du dialogue qu'au niveau du désir mutuel de compréhension [DUR 69, VAN 87].

Tout cela n'est pas simple. Un programme de rééducation ne peut être mis en place pour chacun des malades qu'après avoir établi la difficile sémiologie de son aphasie. Un même signe peut même être imputé à des causes différentes, ce qui implique d'employer des thérapies différentes voire opposées [DUC 86]. Et comme le souligne A. Tissot : "Il peut paraître présomptueux, inutile, voire contre-indiqué d'écrire un essai sur la rééducation de l'aphasique adulte. Présomptueux, puisque nos méthodes sont souvent empiriques. Inutile, puisque aucun cas n'est superposable à un autre. Contre-indiqué, car toute rééducation doit être vécue et repensée en fonction du malade" [TIS 88].

I.5.4 Le but de la rééducation

Le but avoué de la rééducation est de restituer au malade le langage qui était le sien avant l'aphasie sans chercher à tout prix à corriger les imperfections ou combler les lacunes préexistantes. Avant tout exercice, il faut situer le malade dans son entourage passé et actuel, chercher quel a été l'homme, ce qui lui "ressemble" [DUR 69]. Il n'est pas rare en effet qu'un malade soit réticent à travailler si le thérapeute tente de lui faire utiliser un vocabulaire ou des tournures de phrases qui ne lui sont pas familiers [TIS 88], preuve supplémentaire s'il en est du besoin d'adaptation au malade.

La réalité est beaucoup plus cruelle. Sans remettre en cause l'intérêt d'un programme de rééducation dont il est parfois difficile de mesurer les effets, la récupération fonctionnelle du patient n'est souvent pas totale. Rééduquer un aphasique, c'est alors lui permettre de modifier favorablement les conditions de sa vie journalière dans la société en dépit des troubles résiduels qui peuvent subsister [DUR 69, BRU 86].

I.5.5 Méthodes de rééducation [SER 86, PARTZ 94]

I.5.5.1 Introduction

Le choix de la stratégie de rééducation à employer, de la hiérarchie des apprentissages ou réapprentissages à adopter incombe au clinicien. Ce choix se fera parmi quatre types de stratégies classiquement employées en neuropsychologie : les stratégies de rétablissement, de réorganisation, de facilitation et les stratégies palliatives. La rééducation se fera individuellement ou sera une thérapie de groupe.

I.5.5.2 Les stratégies de rétablissement

Les stratégies de rétablissement, bien que décriées par les théoriciens, sont parmi les plus employées en revalidation neuropsychologique. Elles ont pour objectif de rétablir une ou des fonctions cognitives dans leur mode de fonctionnement antérieur à partir d'une description des manques actuels du patient. D'un point de vue empirique, les stratégies de rétablissement visent à faire réapparaître des conduites ou des connaissances normales à l'aide d'exercices répétés et d'entraînements intensifs. D'un point de vue cognitiviste, les stratégies de rétablissement se concentrent sur l'entraînement des mécanismes responsables des troubles.

Ces méthodes impliquent un rétablissement fonctionnel progressif. La difficulté à laquelle se heurtent les neuropsychologues qui emploient de telles méthodes est l'établissement des étapes et des séquences de réapprentissage.

On distingue quatre type de hiérarchies des réapprentissages :

- *Les hiérarchies structurales* : la conduite de la rééducation se base sur la longueur des items et sur les relations qui existent entre les différents éléments qui les composent : "Le mot est plus simple que la phrase, la phrase que le discours, etc.". Caractéristique qui n'est toutefois pas vérifiée chez tous les aphasiques,
- *les hiérarchies développementales* : elles se déroulent suivant leur ordre d'acquisition dans l'ontogenèse. Le matériel utilisé sera alors les manuels scolaires des classes primaires [TIS 88]. Aucune recherche tentant d'établir que le trouble pouvait s'interpréter comme une régression à un stade antérieur du développement n'a toutefois abouti à une conclusion positive,
- *les hiérarchies pathologiques* : l'ordre des réapprentissages serait ici celui de réapparition des conduites lors de la récupération spontanée du malade. Cette approche serait la plus intéressante, mais elle est difficilement applicable car les chercheurs ignorent pourquoi tel ordre de récupération spontanée des conduites survient plutôt qu'un autre,

- *les hiérarchies psychométriques* : elles consistent à proposer en priorité les conduites réussies par le plus grand nombre de patients et à terminer par celles qui ne sont réussies que par peu d'entre eux. Cette pratique est peu employée car il est difficile de dire pourquoi un item est plus compliqué qu'un autre.

I.5.5.3 Les stratégies de réorganisation

I.5.5.3.1 Stratégies de réorganisation des processus centraux

Les stratégies de réorganisation ont pour objectif de réorganiser la conduite pathologique en utilisant à cet égard les mécanismes restés intacts pour aboutir à un résultat fonctionnel identique. Pour certaines conduites, un individu aurait même plusieurs stratégies à sa disposition. Recourir à l'une d'elles dans le cas d'une atteinte cérébrale sélective, pourrait suffire à rétablir la conduite déficitaire.

La réorganisation des processus sous-jacents aux conduites altérées nécessite d'avoir une représentation de ces processus et de la façon dont ils sont reliés pour aboutir à ces conduites, mais aussi d'être en mesure de localiser les processus déficitaires.

Au contraire des stratégies de rétablissement, le clinicien ne tente pas de reconstituer un processus ou un lien entre processus langagiers, mais il essaie plutôt de réorganiser ceux qui sont restés intacts en les utilisant différemment afin d'arriver à un résultat identique à celui qui aurait été obtenu si la conduite n'avait pas été altérée.

I.5.5.3.2 Stratégies de modification des systèmes afférents et efférents

Ces stratégies visent à donner au malade la possibilité d'effectuer une tâche qu'il ne lui était plus possible d'effectuer depuis sa maladie en remplaçant certains moyens afférents ou efférents déficitaires par d'autres restés intacts (stratégies relais ou alternatives) : Beauvois et Desrouesné [BEA 86], ont estimé qu'il devait être possible de modifier les performances d'un patient atteint d'une aphasie tactile bilatérale, R.G., qui ne pouvait verbaliser des objets présentés au toucher mais qui était capable de les mimer en remplaçant la route tacto-verbale par une autre route. Elles décidèrent d'intercaler un relais visuel entre la reconnaissance tactile et la verbalisation (figure I.2). La façon de procéder fut alors de demander au patient d'évoquer l'image visuelle d'un objet placé dans sa main avant de le nommer à partir de cette sensation visuelle : "on lui a demandé de donner un nom à ce qu'il « voyait » et non à ce qu'il sentait", ce qui améliora sensiblement ses performances.

Il est bien évident qu'une telle thérapie ne peut être entreprise que si le mécanisme défaillant ou le lien défaillant entre deux mécanismes a été localisé. Ces stratégies peuvent d'ailleurs servir à localiser cette défaillance (cas du patient M.P. [BEA 86]).

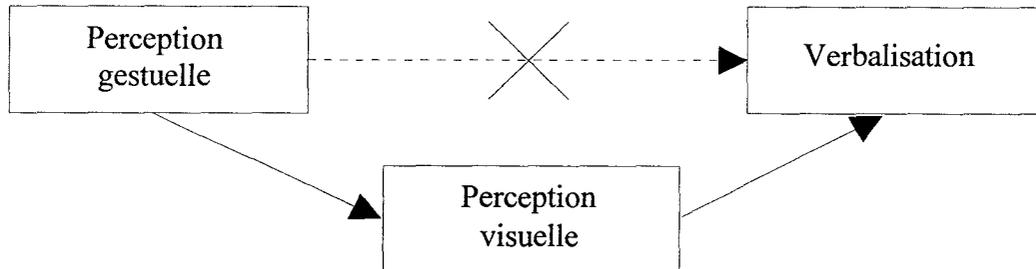


Figure I.2 : Relais visuel intercalé dans la route tacto-verbale. D'après [PARTZ 94].

I.5.5.4 Les stratégies de facilitation

Ces stratégies sont proposées non pas lorsqu'il y a perte d'information, mais lorsque les déficits ressemblent à un déficit d'accès à des informations, des règles ou des procédures restées intactes.

I.5.5.5 Les stratégies palliatives

Ces stratégies ne sont employées que lorsque toute stratégie de rétablissement, de réorganisation ou de facilitation n'a permis de rétablir une conduite défaillante de manière suffisamment efficace. Certaines d'entre elles font appel à des prothèses mentales.

Les prothèses mentales, d'utilisation fréquente chez le sujet normal jeune ou âgé (agenda, nœud au mouchoir...) sont des "petits trucs" qui permettent de se rappeler certaines choses par crainte d'un déficit mnésique.

L'emploi d'une prothèse mentale n'est pas pour autant gage de réussite. Comme le dit H. Guyard : "l'observateur propose mais le malade dispose" [GUY 87]. Il ne suffit pas en effet que la prothèse permette de pallier un déficit, encore faut-il que le malade soit en mesure de l'utiliser avec efficacité.

Certains thérapeutes négligent l'emploi de ces stratégies de la dernière chance, considérant qu'elles empêchent définitivement le patient de recourir aux conduites déficientes. Elles permettent néanmoins au patient, même temporairement, d'améliorer le fonctionnement de cette conduite dans sa vie quotidienne.

I.5.6 Les étapes de la rééducation

I.5.6.1 Quand démarrer un programme de rééducation ?

Le moment choisi par le thérapeute pour commencer la rééducation est variable et dépend de l'importance de l'accident neurologique responsable. Pour Ducarne, c'est en général un mois après l'apparition de la lésion que les premières tentatives doivent être effectuées [DUC 86]. Nous sommes alors en pleine période de récupération spontanée et la mise en place d'un traitement thérapeutique régulier et progressif pendant cette période pourrait favoriser ce processus [SER 86]. Pour Partz par contre, beaucoup de cliniciens n'entrevoient d'utiliser une pratique thérapeutique qu'après que les troubles phasiques se soient stabilisés, donc après la période de récupération spontanée [PARTZ 94].

I.5.6.2 Hiérarchie des séquences

Avant de parler de la hiérarchie des séquences de réapprentissage à distiller au patient, il est important de rappeler qu'il faut s'assurer que la thérapie portera bien sur la fonction déficitaire avant d'engager toute action thérapeutique.

Il est nécessaire de graduer les difficultés, d'aller des tâches les plus simples vers les tâches les plus compliquées en faisant en sorte qu'elles soient adaptées au patient : ni trop faciles ni trop difficiles. Certains problèmes seront juste effleurés si la réussite est rapide, d'autres seront approfondis lorsqu'il constituent une difficulté spécifique pour le patient ou qu'ils lui permettent de franchir une étape [TIS 88].

La hiérarchie des séquences tiendra aussi compte de la durée des épreuves et des pauses nécessaires sinon obligatoires (environ dix minutes toutes les heures [BRU 86]).

Tout le problème est de déterminer les critères de complexité qui permettent d'établir cette hiérarchie : ontologie, ordre d'acquisition lors de la récupération spontanée, évolution de groupes de patients à condition de pouvoir trouver des personnes ayant des troubles similaires, ce qui est souvent loin d'être le cas.... Il est risqué de se baser sur les programmes didactiques pour enfants car les niveaux de performance et l'ordre de progression chez le patient aphasique ne sont pas forcément identiques à ceux que l'on peut observer chez le sujet normal : "Les patients « ont su » et savent toujours à des degrés divers" [DUC 86]. Ce qui permet à Ducarne d'ajouter : " Est-il plus facile à un aphasique expérimenté en mathématiques de refaire un calcul d'intégrales plutôt qu'une division ? et pour un agnosique de reconnaître une image banale plutôt qu'une lettre, un mot courant ou une couleur ?".

La hiérarchie d'un programme de rééducation sera aussi fonction des résultats observés lors des différents tests que le patient est susceptible de passer en cours de traitement, et

résulte souvent de l'intuition du thérapeute [PARTZ 94]. Le passage d'un niveau de difficulté à un autre pourra se faire après que le patient ait répondu correctement à "n" items successifs, n étant déterminé par le thérapeute (3 à 10). En cas d'échec, ce dernier déterminera s'il faut continuer au même niveau, reculer d'un ou plusieurs crans voire revenir au niveau initial [BRU 86].

I.5.6.3 Evaluation de l'efficacité de la rééducation

L'évaluation de l'efficacité d'un programme de rééducation est une tâche difficile à réaliser. Pour preuve : A quoi peut-on attribuer les effets d'une tentative de rééducation qui serait employée durant les premiers mois qui suivent l'accident cérébral ? A ce programme mis en place et donc au thérapeute ou bien alors à la récupération spontanée, et dans cette dernière hypothèse à un phénomène qui aurait de toute façon conduit aux progrès enregistrés [SER 83b]. Montrer que le patient évolue grâce à une intervention thérapeutique, c'est montrer qu'il n'aurait pas évolué de la même façon sans rééducation [SER 79].

Une forme d'évaluation de l'efficacité d'une thérapie est de proposer une rééducation à un groupe d'aphasiques et de prendre un groupe témoin qui n'en bénéficierait pas [BAS 75]. Une différence d'évolution significative en faveur du groupe rééduqué pourrait amener le spécialiste à conclure sur l'efficacité de sa méthode. Encore faut-il que les groupes mis en opposition présentent une certaine homogénéité, ce qui est souvent loin d'être le cas et que les effets bénéfiques observés soient reproductibles ensuite par d'autres patients. Cette méthode d'évaluation pose cependant un grave problème éthique : a-t-on le droit d'empêcher un groupe témoin de patients de bénéficier d'une thérapie ?

Le pré-test et le post-test sont des éléments qui permettent de déterminer s'il y a eu évolution lors de la rééducation [TER 87]. Encore faut-il que ces tests se déroulent de la même manière et que le patient présente des comportements identiques. Comportements qui peuvent comme chez le sujet normal varier en fonction de divers paramètres comme la fatigue, l'état d'excitation, etc. [BRU 86].

Des évaluations des performances effectuées régulièrement permettent d'apprécier l'effet de la thérapie mais aussi de modifier le programme mis en place ou de le stopper [BUT 86]. Ce programme peut même être modifié en cours de séance, en notant toutefois que l'évolution des patients est lente.

L'évaluation de l'efficacité d'une thérapie à l'aide des techniques ABA et ABAB (figure I.3) demande au préalable que le patient présente un niveau de performance stable (A). On entreprend alors une thérapie (B) puis, à un moment donné on interrompt cette

intervention thérapeutique et on observe s'il y a arrêt des progrès (A) ou régression (A'). On reprend ensuite la thérapie (B ou B') et on observe s'il y a reprise des progrès. Cette méthode pose un problème car l'arrêt de la thérapie peut être préjudiciable au patient et peut rendre ses réacquisitions beaucoup plus difficiles par la suite [SER 79].

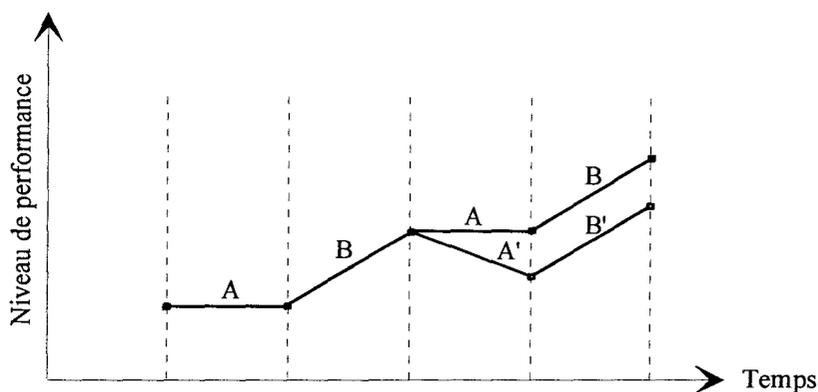


Figure I.3 : Paradigme ABA ou ABAB (d'après [PARTZ 94]).

I.5.6.4 La fin d'un programme de rééducation

La durée d'un programme de rééducation est variable. Si la récupération dépend bien évidemment de la gravité de la lésion cérébrale, elle pourra varier en fonction de la personnalité du malade, du moment où elle aura lieu (période de la journée ou le patient est très réceptif) et de l'intensité du programme (une à plusieurs séances quotidiennes). Dans ces conditions, la rééducation peut durer de 3 mois à 3 ans [DUC 86].

Lorsque le patient qui suit une thérapie ne progresse plus, il arrive un moment où il faut décider d'arrêter le traitement. La récupération des fonctions langagières est alors souvent incomplète et cette interruption est un moment dramatique à la fois pour le patient, mais aussi pour le thérapeute qui reste son dernier espoir [BUT 86]. Il est bien clair que cette interruption n'a lieu que lorsque le thérapeute a essayé tout ce qu'il était en mesure d'essayer : lorsque le patient ne progresse plus, l'abandon de méthodes de rééducation au profit d'autres méthodes peut permettre de favoriser l'acquisition envisagée, et parfois il suffit de trouver le petit "truc" qui permet d'éviter une stagnation qui aurait été définitive [DUC 86].

Lorsque la fin de la thérapie est envisagée, celle-ci doit s'effectuer en douceur. Les séances deviendront de plus en plus espacées dans le temps. Cela permet également de produire un accroissement de l'autonomie du patient [BRU 86].

Par la suite, il sera nécessaire de vérifier s'il y a eu transfert des acquis à d'autres conduites non rééduquées et de vérifier que les bénéfices du traitement sont toujours présents à long terme (plusieurs mois ou années après la fin du traitement).

I.5.7 Cas de l'aphasique global

Le tableau clinique est si sombre dans le cas d'une aphasie globale qu'il exclut bien souvent tout essai de rééducation ou, du moins, le diffère. Mais en tout état de cause, la rééducation d'une aphasie globale est brève : si on n'enregistre aucun progrès, il est inutile de continuer, alors que si un début de communication devient possible, l'aphasie évolue vers une des autres formes, ce qui permet de démarrer une thérapie en conséquence [TIS 88].

I.6 Conclusion

Proposer une thérapie à une personne souffrant de troubles phasiques ne consiste pas à vouloir lui apporter des connaissances nouvelles ou comme nous l'avons déjà mentionné, à corriger ses imperfections, auquel cas nous parlerions d'éducation. C'est essayer de reconstruire brique par brique sinon par pans entiers l'édifice constitué des activités langagières de cette personne, à l'image de ce qu'elle était avant la survenue de la lésion cérébrale. La connaissance de la structure de cet édifice est essentielle à sa restauration, c'est ce que tente d'établir la neuropsychologie cognitive. Les modèles cognitifs qu'elle dégage permettent de rendre la rééducation plus efficace. Pour y arriver, le clinicien dispose alors d'un artifice de méthodes qu'il est mesuré de proposer au patient en fonction de l'évolution de son aphasie.

Ces dernières années ont vu se multiplier les tentatives de revalidation faisant appel à la micro-informatique. Nous évoquerons dans les pages qui suivent des avantages et des inconvénients que suscite l'emploi de ces machines.

Chapitre II

SPECIFICATIONS D'UN TUTEUR DE REEDUCATION DES TROUBLES DU LANGAGE

II.1 Introduction

Il ne fait aujourd'hui plus aucun doute que la rééducation a un effet bénéfique sur l'évolution des patients, et tout outil susceptible d'aider le patient dans cette voie doit être pris en considération. Un micro-ordinateur est un outil puissant qui permet de réaliser des évaluations rigoureusement constantes dans leurs déroulements et dans leurs interprétations et qui peut également être utilisé pour faire de l'apprentissage (E.A.O., E.I.A.O.). Le but de la rééducation, comme nous en avons discuté préalablement est de rétablir le langage du malade dans l'état où il se trouvait avant son aphasie. Les méthodes les plus employées sont les stratégies de rétablissement (cf. I.5.5.2) qui comportent toutes des programmes rigoureux et intensifs constitués de suites d'exercices répétés jusqu'à ce que le patient les exécute avec succès, exercices bien sûr adaptés aux déficits présentés par le patient. Il y a tout lieu dans ces conditions de faire un rapprochement entre l'enseignement assisté par ordinateur traditionnel et la rééducation des aphasiques. La nature des tâches diffère pourtant, puisque la rééducation des aphasiques concentre ses efforts sur les modalités du langage. On pourra rétorquer qu'un E.A.O. des langues étrangères se consacre au même but, mais ce serait oublier qu'à la base, l'apprenant qui s'en sert a une langue maternelle préservée.

Un E.I.A.O. comprend traditionnellement quatre modules : un expert du domaine à enseigner, un pédagogue, une représentation de l'état des connaissances de l'apprenant et une interface de dialogue entre l'homme et la machine. Si la représentation du domaine de notre expert est de nature équivalente pour un public normal et pour un public présentant une pathologie, la pédagogie en diffère déjà. Mais surtout, il va sans dire qu'avec des utilisateurs dont le langage est pour le moins affecté, la conception de l'interface utilisateur revêt une importance capitale. Et que dire du modèle de l'élève qui conditionne l'ensemble du programme de rééducation. Est-il acceptable de se contenter de compter les bonnes et les mauvaises réponses ? Peut-on se référer à un catalogue d'erreurs ? Doit-on interpréter les résultats du patient par rapport aux performances que réaliserait un élève idéal (sujet sain), un aphasique de Broca ou un aphasique de Wernicke ?

La rééducation des aphasiques est aussi un processus qui s'étale sur de longs mois à raison d'une ou plusieurs séances quotidiennes. D'humeur toujours égale et constamment disponible, le micro-ordinateur est un partenaire au service du malade et au même titre que le thérapeute, il doit savoir l'écouter, l'encourager et lui permettre de retrouver sa dimension humaine, quelque part perdue au moment de la survenue de la pathologie.

II.2 Limitations matérielles

L'aphasie est un trouble acquis du langage qui altère la compréhension et la production du langage aussi bien à l'écrit qu'à l'oral. Un ordinateur permet-il d'évaluer les perturbations de l'ensemble de ces caractéristiques du langage ? Il existe aujourd'hui des outils de synthèse et de reconnaissance vocale performants, et bien que des progrès énormes aient été réalisés tant en compréhension qu'en production de langage naturel, force est de reconnaître que l'emploi de tels procédés reste limité et que nous sommes encore loin de pouvoir tenir une conversation orale avec une machine. De même, s'il existe des logiciels de reconnaissance de caractères manuscrits, développer une application qui permettrait d'analyser une feuille de papier nécessiterait de scanneriser préalablement cette feuille ou de lui infliger un traitement similaire.

Dans la majorité des cas, le dialogue se fera donc par l'intermédiaire de l'écran comme c'est le cas dans un logiciel d'E.A.O. traditionnel et pourquoi pas par l'intermédiaire du haut parleur en se servant si possible de ressources sur CD-ROM dont la capacité de stockage et de transfert de données sont tout à fait adaptées à cet usage.

II.3 Les composantes d'un tuteur à l'usage du cérébro-lésé

II.3.1 La communication Homme-Machine

II.3.1.1 Introduction

La communication entre l'homme et la machine représente un élément clé de tout système informatique et joue par conséquent un rôle très important dans le succès d'un logiciel. Il faut que le dialogue entre l'homme et la machine soit simple d'utilisation, efficace, compréhensible et fiable en utilisant les modalités du langage et de communication des êtres humains : écriture, parole, graphismes animés ou non.

Dans un tuteur pour aphasiques, on s'adresse non seulement au malade, mais aussi au thérapeute en charge de lui choisir un programme d'évaluation ou de rééducation. Le travail est donc double et les exigences différentes pour l'un et l'autre de ces partenaires. Dans les

lignes qui suivent, nous nous situerons plus volontiers du côté du malade, la raison en est simple, c'est justement du côté communicatif que se trouve son trouble principal. Il est encore plus important de veiller au bon confort du malade et au respect de ses habitudes, même si celui-ci n'a jamais utilisé d'ordinateur : on sait pour le sujet sain que les outils informatiques lui posent des problèmes de rejet, d'inadaptation à utiliser cet instrument de travail et une certaine incapacité à s'approprier de nouvelles technologies [VANH 94].

II.3.1.2 L'avènement des interfaces utilisateur graphiques

Il y a quelques années encore, les terminaux d'ordinateurs se contentaient d'une communication alphanumérique avec l'utilisateur par l'intermédiaire d'un écran monochrome. Aujourd'hui, des progrès énormes ont été réalisés dans l'ergonomie des interfaces homme/machine grâce à :

- des machines dont la puissance augmente de plus en plus rapidement tant en vitesse qu'en capacité de stockage (processeur, mémoires, disques durs, CD ROM),
- l'exploitation conviviale d'écrans couleur haute résolution (logiciels McIntosh, Windows, etc.)
- une diffusion étendue des matériels qui a permis d'abaisser les coûts des matériels et des logiciels et de démocratiser voire de banaliser le micro-ordinateur (McIntosh d'Apple et P.C. d'IBM ou compatible).

L'arrivée en 1972 de Smalltalk, puis de Smalltalk 80, a révolutionné le monde de la communication homme/machine en demandant à l'utilisateur de pointer et de sélectionner des fenêtres graphiques à l'aide d'une souris. Cela évitait beaucoup d'erreurs dues à des choix incorrects de touches du clavier. Depuis, nous avons assisté à la généralisation des interfaces utilisateur graphiques (fortement vulgarisées depuis l'apparition du McIntosh en 1984), et malgré leur grande variété, toutes possèdent une partie des différents éléments du système Smalltalk et que l'on associe habituellement à ce type d'interface :

- un périphérique de pointage, souvent une souris,
- des menus à l'écran qui peuvent apparaître ou disparaître sous le contrôle de la souris,
- des fenêtres qui affichent graphiquement ce que l'ordinateur est en train de faire,
- des icônes qui représentent graphiquement des applications,
- des boîtes de dialogue, des boutons, des curseurs, des cases à cocher, etc.

Les applications avec interface graphique sont destinées à s'exécuter dans des environnements qui comportent d'autres applications conçues sur le même principe. Dans ces

conditions, l'avantage pour l'utilisateur est immense : si celui-ci utilise plusieurs applications, il ne lui sera nécessaire d'apprendre à se servir que de l'une d'elles car cet investissement lui permettra de travailler avec toutes les autres applications.

II.3.1.3 Ergonomie et Interfaces Homme / Machine (I.H.M.)

L'ergonomie d'une interface utilisateur est très importante puisque cela conditionne son apprentissage et son confort d'utilisation. Si aucun consensus n'existe en matière de conception d'interfaces, beaucoup d'études ergonomiques ont été menées afin d'améliorer la communication entre l'homme et la machine et de définir les informations qui doivent être fournies à l'utilisateur. En voici cinq :

- dans un guide de conception des I.H.M. [SCA 86], Scapin recense les principaux défauts que l'on rencontre dans les interfaces (insuffisance de connaissance du profil des utilisateurs, de méthodologie, d'homogénéité, de prévision des erreurs de manipulation, du nombre d'informations essentielles à afficher, etc.) et fournit un recueil de recommandations qu'il convient de respecter lors de la réalisation d'une interface,
- Coutaz [COU 90], présente un recueil de modélisations du processeur humain (traité comme un système de traitement d'informations), de principes ergonomiques, de méthodes et d'outils de conception des I.H.M.,
- Kolski pour sa part s'est penché sur la conception et l'évaluation des I.H.M. dans le domaine industriel. Des spécifications ergonomiques liées aux caractéristiques de l'opérateur humain ainsi que des méthodes d'évaluation des interfaces pour lesquelles sont précisées la façon dont on peut les exploiter dans le domaine du contrôle de procédés sont recensées dans [KOL 93],
- I.B.M. a étudié le problème et a présenté C.U.A. (Common User Access), un ensemble de recommandations d'ergonomie visant à normaliser et standardiser les interfaces utilisateur. C.U.A. est une norme évolutive synonyme d'interface graphique avec ou sans souris dont les concepts ont été utilisés pour l'élaboration des interfaces pour P.C. Windows 3 pour les systèmes MS-DOS et M.M.P.M./2 (Multimédia Presentation Manager) pour les systèmes OS/2 [VANH 94],
- Norman, intéressé par les erreurs et les difficultés rencontrées dans la vie de tous les jours avec les objets qui nous entourent, propose un certain nombre de principes généraux qui permettent d'éviter les bévues du design [NOR 88], et par conséquent les erreurs de manipulation (acte manqué). Une autre approche consisterait même à anticiper les possibilités d'erreur d'utilisation et à concevoir un système dont la forme elle-même conduit l'utilisateur sur la bonne voie [BAD

93]. En informatique, un facteur déterminant de réussite réside dans l'attention portée à la bienveillance du système à l'égard de l'utilisateur qui doit d'abord *savoir utiliser un système, avant de pouvoir demander comment l'utiliser*. Les caractéristiques des interfaces utilisateur graphiques mentionnées plus haut associées à une aide en ligne (avec ou sans hypertexte) œuvrent dans ce sens et leur succès repose en grande partie sur l'attention portée aux besoins et aux possibilités de l'utilisateur [PIT 92].

En tout état de cause, il s'agit de voir l'ordinateur plutôt comme un outil au service de l'utilisateur que comme une fin en soi. On sacrifiera donc volontiers la performance aux objectifs des utilisateurs et à leur confort [SCA 86].

II.3.1.4 Facultés cognitives importantes pour l'utilisation d'I.H.M.

II.3.1.4.1 Mémoire à court terme

La mémoire à court terme (M.C.T.) est une mémoire transitoire et limitée en taille dont la fonction est "d'empêcher la dissipation de l'information sensorielle avant son traitement par des processus de niveau plus élevé" (mémoire permanente ou à long terme : M.L.T.) [TIB 94]. Le contraste entre une M.C.T. ne permettant la rétention que de moins de dix unités pendant quelques secondes seulement et une M.L.T. en principe à capacité presque illimitée et quasiment sans oubli a conduit dans un premier temps à supposer que ces deux entités étaient distinctes : *modèle modal* de la mémoire de Shiffrin et Atkinson [ATK 68]. Plus récemment, Baddeley a fait l'hypothèse que ces deux mémoires fonctionnaient en parallèle et baptisa la M.C.T. du nom de mémoire de travail (*working memory* en anglais). Selon Baddeley [BAD 93], la mémoire de travail serait composée de trois sous-systèmes : une *boucle phonologique* (mémoire phonologique et processus de répétition de type articulatoire pour rafraîchir l'information) mobilisée pour les informations à caractère verbal écrit ou auditif, un *calepin visuo-spatial* mobilisé pour les informations visuelles et spatiales et un *administrateur central* qui gère la répartition des informations entre ces deux entités.

Norman et Shallice [NOR 86] considèrent que l'administrateur central fonctionne davantage comme un système attentionnel de contrôle de l'activité (*système attentionnel de supervision* ou S.A.S.) que comme un système de stockage. Dans la plupart des activités cognitives, les opérations mentales doivent être organisées sous la forme de schémas d'activation pour pouvoir se dérouler : dans des situations complexes ou nouvelles, plusieurs programmes d'action doivent pouvoir se combiner sous l'action d'un système superviseur qui attribue des priorités afin que le déroulement des opérations soit cohérent. Entre parenthèses, des expériences ont d'ailleurs souligné la possibilité d'un lien entre la boucle phonologique

dont nous venons de parler et, la langue ainsi que les activités mathématiques (comptage et calcul mental) [BAD 93].

II.3.1.4.2 Attention, vigilance et conduites automatiques

II.3.1.4.2.1 Attention

Il n'existe pas de consensus chez les psychologues pour définir le concept d'attention sans lequel il ne serait question ni d'apprentissage, ni de mémorisation, ni de résolution de problèmes, etc.

L'état d'attention est un processus multimodal qui dépend de variables propres au sujet (état, âge, vigilance) et du type d'informations à traiter. Trois modalités peuvent être distinguées :

- *l'attention soutenue* qui est la capacité de détecter une information dont l'apparition est imprévisible et d'y répondre de manière adéquate,
- *l'attention focalisée* qui est la capacité de se concentrer sur un message pertinent et d'éliminer les informations venant des autres messages,
- *l'attention divisée* qui est la capacité de partager ses ressources entre plusieurs sources d'information.

Remarque : on regroupe attention focalisée et attention divisée sous le terme d'*attention sélective*.

II.3.1.4.2.2 Vigilance

La vigilance est liée au concept d'attention soutenue. Elle se décompose en niveaux croissants de vigilance correspondant à une activité nerveuse de plus en plus intense : sommeil, veille diffuse, veille attentive, émotionnel et hyperactivité, n'entraînant pas des performances allant dans le même sens. Il existe en effet un niveau de vigilance, légèrement supérieur à l'état de veille attentive, pour lequel les performances sont maximales tel que :

- en deçà de ce niveau, plus la vigilance baisse et plus les performances diminuent (hypovigilance),
- au delà de ce niveau, la performance chute à cause d'une activité nerveuse incontrôlée (hypervigilance).

Il ne suffit pas donc pas d'être vigilant pour être attentif.

Remarque : on utilise généralement vigilance et attention sans distinction alors que ces deux concepts sont différents : la vigilance est une fonction physiologique qui se caractérise

par une densité d'activité nerveuse et l'attention est une fonction psychologique qui correspond à un niveau de veille.

II.3.1.4.2.3 Conduites automatiques [SIE 94]

Les processus automatiques pourraient se dérouler sans faire intervenir systématiquement l'attention grâce à un processus différent du S.A.S. : *le gestionnaire des priorités de déroulement* [BAD 93]. A mesure que la situation devient plus routinière, la demande attentionnelle diminue et permet de réaliser plusieurs activités en parallèle avec une plus grande rapidité d'exécution et sans faire appel à la conscience. Donc, rapporté à un système informatique, plus une personne est habituée à ce système, plus ses gestes s'automatisent et influent sur la facilité d'utiliser son interface utilisateur.

Les automatismes ont cependant quelques inconvénients :

- ils s'activent dans des situations semblables et peuvent déboucher sur des erreurs si la similitude n'est pas totale. C'est par exemple se rendre à un lieu de rendez-vous habituel alors qu'exceptionnellement celui-ci avait changé. Les conduites routinières sont donc difficiles à modifier,
- contrairement aux opérations attentionnelles, les automatismes ne permettent pas de mémoriser efficacement les informations.

II.3.1.4.2.4 Récapitulatif

Les traitements automatiques procèdent sur des informations spécifiques dans des situations données alors que les procédures attentionnelles s'adressent à la nouveauté (Fig. II.1).

Traitement attentionnel	Traitement automatique
contrôlé	autonome
choix, sélection	obligatoire
effort mental, capacité limitée	sans charge mentale, large capacité
lent et séquentiel	rapide et parallèle
traitement de la nouveauté	traitement lors de la constance de l'environnement

Figure II.1 : Caractéristiques de l'attention et de l'automatisme. D'après [SIE 94].

II.3.1.5. Interfaces utilisateur et troubles du langage

II.3.1.5.1 Introduction

La communication homme-machine s'intéresse à l'ensemble des fonctions qui relèvent de la communication : perception, décodage et reconnaissance, production, etc., d'informations qui peuvent apparaître sous diverses formes (communication multimodale) : écrite (texte, graphiques), orale, voire gestuelle ou visuelle. L'interaction multimodale fait l'objet de nombreuses recherches et notamment en France où elles sont coordonnées par le GDR-PRC "communication homme-machine" [GDR 94]. Ses buts principaux sont d'améliorer l'efficacité de la communication en utilisant plusieurs canaux de communication en même temps, de la rendre plus fiable grâce à la redondance d'informations issues de sources différentes, d'adapter le mode de communication avec l'utilisateur en fonction de la tâche à réaliser, d'étendre les capacités sensori-motrices de l'usager et ne plus se limiter à un environnement utilisateur/écran/clavier/souris.

Ces recherches sont d'un intérêt majeur à plus d'un titre pour quiconque désire faire collaborer une machine et une personne aphasique. Même si l'aphasie ne touche que sélectivement le langage, cette atteinte peut le toucher dans différentes modalités. Si on désire utiliser une machine au service du malade, il ne faut évidemment négliger aucune des manifestations du trouble, voilà pour le premier point. Ensuite, de façon plus pratique, se pose le problème de la communication avec le malade. Là encore, toutes les formes de communication doivent être envisagées parce que tout moyen d'entrer en communication avec le malade est le bienvenu. Et lorsque cette communication est établie, il faut savoir décoder le langage désorganisé qui en ressort.

Au delà de ces considérations, des troubles physiques ou d'autres troubles cognitifs (mnésiques, attentionnels, visuels, etc.) accompagnent généralement l'aphasie. Il faut également en tenir compte lors de la réalisation de l'I.H.M.

II.3.1.5.2 Conséquences liées à la limitation de la mémoire à court terme

Une sérieuse limitation dans le fonctionnement de notre cerveau vient de la capacité très réduite de notre mémoire à court terme qui nous sert de mémoire de travail et dont la capacité (*empan mnésique*) n'est pas clairement établie. Les premiers chercheurs pensaient qu'elle est de l'ordre de sept éléments plus ou moins deux [MIL 56]. Mais il est apparu ensuite que sa capacité exacte n'était pas facile à définir parce que les circonstances d'utilisation sont variées et que les résultats en dépendent. En fait la limitation de l'empan n'est pas d'environ sept éléments indépendants, mais de cinq à neuf groupes constitués d'éléments unitaires (*chunks* en anglais) : le numéro de téléphone "20, 43, 48, 76" comprend quatre unités et sera mieux retenu que la séquence "2, 0, 4, 3, 4, 8, 7, 6" qui comprend huit unités. Les capacités de

mémorisation à court terme sont également inversement reliées à la longueur des mots. Et classiquement, les premiers et les derniers éléments d'un ensemble d'éléments sont mieux rappelés que les éléments centraux [BAD 93].

Les limitations en capacité et en durée de la M.C.T. impliquent qu'il faut éviter à tout prix d'avoir trop d'informations à gérer simultanément dans l'interface utilisateur. Celle-ci doit être conçue comme un prolongement de la M.C.T. de cette personne : si les informations restent accessibles visuellement, le rafraîchissement de l'information dans la mémoire de l'utilisateur se fait par la lecture de l'écran, il s'en trouve donc facilité. Ce n'est bien sûr pas le cas si les informations sont délivrées de façon temporaire ou auditive, auquel cas, les limitations des capacités de la mémoire à court terme, variables d'un individu à l'autre, doivent être scrupuleusement respectées.

Pour Warrington et McCarthy [McCAR 94], la taille de l'empan des sujets, même si elle est réduite, ne poserait pas de problème de compréhension du langage, même pour des phrases longues.

II.3.1.5.3 Autres troubles qui peuvent accompagner l'aphasie

II.3.1.5.3.1 Troubles de la motricité

Les atteintes cérébrales s'accompagnent souvent de troubles moteurs. Ceux-ci comprennent :

- la paralysie due à une lésion des aires motrices (hémiplégié droite en général),
- les troubles de la motricité volontaire pour lesquels les aires motrices sont intactes et dont les conséquences sont des troubles concernant la répétition de mouvements simples, les gestes non familiers, les tâches constructives, l'utilisation d'objets, etc.

II.3.1.5.3.2 Troubles de la vigilance et de l'attention

Les troubles de la vigilance entraînent une incapacité à maintenir l'attention (nécessaire à toute activité cognitive) marquée par la distractibilité du patient et une activité toujours pauvre.

Des études effectuées chez des patients souffrant de lésions frontales ont montré que ces lobes jouent un rôle important dans la planification, l'organisation et le contrôle de l'activité. Ce déficit se situerait au niveau du S.A.S. (cf. II.3.1.4.1) et consisterait pour les patients soit à réaliser une tâche qu'ils effectuent de façon répétitive parce qu'ils ont perdu la capacité de les arrêter, soit à être incapable de démarrer une tâche parce qu'aucun programme d'action n'est déclenché par le S.A.S., ce qui les laisse inertes [BAD 93].

II.3.1.5.3.3 Troubles de la mémoire

Les troubles de la mémoire sont variés. La mémoire à court terme et plus particulièrement la boucle phonologique seraient impliquées dans l'apprentissage de la lecture, dans la compréhension du langage et dans l'acquisition du vocabulaire [BAD 93].

Les patients peuvent avoir une diminution des capacités de leur mémoire à court terme alors que leur mémoire à long terme reste intacte et inversement.

II.3.1.5.3.4 Troubles visuo-spatiaux

L'*hémiparésie* est un trouble de l'attention sélective qui concerne l'attention visuelle spatiale et qui consiste essentiellement en une mauvaise appréhension des événements qui apparaissent du côté opposé à la lésion du patient : par exemple, en cas de lésion droite, négligence de la moitié gauche d'une feuille ou d'un écran, etc. La copie de figures en souffre également, et une hémiparésie visuelle peut entraîner des difficultés à aligner correctement des chiffres dans des problèmes de calcul écrit [McCAR 94].

C'est un handicap sérieux et les patients peuvent aussi avoir des difficultés à juger à quelle distance se trouvent les objets et à déterminer leur position (gauche ou droite).

II.3.1.5.3.5 Troubles de la vision des couleurs [LHE 69]

Les troubles de la vision des couleurs concernent principalement les bleus-verts, les rose-orangé, caractéristiques d'une difficulté prédominant dans l'axe bleu-jaune. Lorsqu'ils sont peu marqués, ces troubles affectent surtout les couleurs peu ou très saturées (pâles ou sombres). Par contre, dans l'étude citée en référence, Lhermitte et ses collaborateurs n'ont pas observé d'erreurs lorsque les images étaient en niveaux de gris.

On constate également des troubles dans la dénomination, l'évocation ou le choix des couleurs (agnosie des couleurs) qui peuvent parfois être liées au manque du mot.

Les troubles de la vision chromatique se rencontrent surtout chez les malades atteints de troubles dissociés ou exclusifs de la lecture (cécité verbale pure) [LEC 79].

II.3.1.5.3.6 Fatigabilité et lenteur

Les aphasiques sont dans l'ensemble très sensibles aux effets de la fatigue (épuisement des réseaux neuro-axonaux) qui se caractérise par des comportements de persévération et en phase de rééducation cela peut aller jusqu'à inhiber tout apprentissage [LEC 79].

On peut contrecarrer la fatigue efficacement en intercalant des pauses dans les séances de rééducation (une au minimum toutes les heures [SER 83b]).

La lenteur des productions des aphasiques est moins grave, si ce n'est qu'elle rallonge la durée des séances de rééducation, mais il faut en tenir compte. Notamment lorsqu'on laisse un délai fixe au malade pour répondre (pour éviter à la personne de buter sur un problème quelle ne peut résoudre ou lui éviter de disposer d'un temps d'autocorrection trop important qui peut l'amener à modifier ses productions de façon incorrecte) ou lorsqu'on lui présente brièvement des informations.

II.3.1.5.3.7 Désorientation spatiale

L'orientation dans l'espace est une fonction complexe qui fait intervenir de nombreux mécanismes distribués dans les deux hémisphères cérébraux, et tout particulièrement dans l'hémisphère droit pour ce qui concerne les aspects cognitifs de la représentation de l'espace [JEA 94].

Les troubles de la gestualité intentionnelle (apraxie) désignent une perturbation d'un mouvement volontaire en l'absence de paralysie. Ils ne sont donc pas d'ordre sensori-moteur et, en cas de lésion gauche, les risques de présenter des troubles du geste sont bien plus élevés lorsque le malade présente de troubles du langage [FEY 94]. Les troubles du geste sont à associer aux processus du contrôle de l'action (cf. II.3.1.4.1). Ils se rencontrent notamment lors de l'utilisation d'objets, lors d'activités graphiques (dessin, écriture, reconstitution de motifs) ou lors l'assemblage d'éléments (localisation dans l'espace, estimation de leur taille, incapacité de suivre une route d'un endroit à un autre).

Ils sont donc à prendre en compte lors de l'élaboration de l'I.H.M. aussi bien pour le choix des périphériques de communication que pour leur utilisation s'ils peuvent engendrer des difficultés à atteindre la cible (cas d'un périphérique de pointage).

II.3.1.5.4 Principes ergonomiques de réalisation de l'I.H.M.

II.3.1.5.4.1 Pertinence de l'information

Il importe que l'interface utilisateur ne présente que les informations nécessaires à l'opérateur pour effectuer chacune de ses tâches. Il convient donc d'éliminer les informations excédentaires et inutiles qui surchargent mentalement le malade, ce qui n'est pas toujours le cas puisqu'on a tendance à afficher un maximum d'informations afin d'être sûr de n'avoir rien oublié. C'est aller à l'encontre du bon sens et c'est surtout ne pas tenir compte des capacités cognitives, de la capacité de travail de l'opérateur quel qu'il soit, capacité qui est limitée, différente et susceptible de varier en fonction de l'état de l'opérateur [MILL 88] et à fortiori s'il s'agit d'une personne diminuée psychologiquement et physiquement.

Chaque information doit également être présentée sans ambiguïté et ne pas nécessiter d'effort mental de compréhension [KOL 89]. C'est une tâche difficile à réaliser pour une application à destination de personnes souffrant de troubles du langage. Il faut trouver les mots ou les graphismes justes en sachant que la diversité des troubles et leur caractère évolutif fait qu'il est difficile d'adapter l'interface utilisateur à tous les patients, à moins d'utiliser plusieurs modes (mots, dessins) ou canaux de communication (écrit, oral).

Une bonne connaissance du malade est nécessaire avant de le mettre face à la machine. Il faut s'assurer que celui-ci est en mesure d'utiliser les outils qu'on lui propose ou du moins caractériser les difficultés qu'il rencontre (utilisation des périphériques : clavier, souris, etc., compréhension des informations présentées) afin de ne pas les interpréter comme des troubles cognitifs corrélés à la désorganisation de son langage.

En règle générale, l'interface utilisateur (généralement graphique), doit faciliter l'accomplissement des différentes tâches de l'utilisateur et non pas être vécue comme une contrainte.

II.3.1.5.4.2 Automaticité des conduites

L'utilisation de l'I.H.M. évolue en fonction du niveau d'expérience de l'opérateur, de sa connaissance des tâches à accomplir et de l'interface utilisateur. La prise en compte de tels paramètres peut conduire à offrir plusieurs niveaux d'utilisation à l'opérateur en fonction de son niveau d'expérience (novice, intermédiaire, expert, maître) [VAL 87]. Cela peut s'avérer justifié pour le thérapeute qui à la longue connaît parfaitement les épreuves qu'il soumet à ses patients. Des raccourcis ou des macro-commandes peuvent aussi lui être utiles.

Pour le malade par contre, la tâche est limitée à l'exécution des exercices. Il est donc nécessaire de former préalablement celui-ci à l'utilisation de l'interface (présentation d'un exercice à consigne simple utilisant l'interface utilisateur) et à la tâche à réaliser (session de quelques items du même ordre que l'exercice réel pour vérifier la compréhension de la consigne) puis de conserver un usage identique de l'interface lors de chaque session future afin de ne pas bousculer les automatismes d'utilisation du système qui se créent chez lui. Cela permet également d'avoir des conditions d'expérimentation constantes et d'avoir ainsi une base fiable et reproductible pour évaluer les performances du malade.

II.3.1.5.4.3 Rapidité de l'interface

Le temps de réponse de l'I.H.M. peut être considéré comme le temps qui s'écoule entre le moment où l'utilisateur a lancé une commande (ouverture de fichier, traitement de données, lancement d'une application, etc.) et le moment où le système répond.

Pour un utilisateur sain, un effort doit donc être fait pour garder les temps de réponse dans une limite acceptable (en principe 0,5 seconde), dans la mesure où ils affectent l'attitude de l'opérateur vis-à-vis du système informatique [SCA 86]. Il peut être utile aussi d'agrémenter l'attente de l'opérateur par un message ou par un graphisme (sablier, montre, etc.).

Pour une personne cérébro-lésée, le temps de réponse de l'interface est moins important. D'une part, parce que les réponses du malade sont toujours lentes, d'autre part, parce que les malades sont très fatigables (physiquement et psychologiquement) [BOE 86], ils peuvent donc profiter du temps de réponse du système (qui peut volontairement être augmenté) pour se reposer.

II.3.1.6 L'environnement informatique d'un tuteur pour cérébro-lésés

II.3.1.6.1 Introduction

Tout système d'enseignement informatisé quel qu'il soit fait appel à une unité centrale (généralement un micro-ordinateur de type P.C. ou Apple) et aux organes de communication traditionnels de celui-ci. Tous bien sûr ne sont pas adaptés aux mêmes tâches ni aux mêmes publics. C'est encore plus vrai lorsque les utilisateurs présentent un ou plusieurs handicaps. L'interface utilisateur est alors la pièce maîtresse du système et doit être parfaitement adaptée aux possibilités tant motrices (organes d'entrée et de sortie des informations) que linguistiques (compréhension des messages et consignes, production de réponses) du malade et à ses capacités d'utilisation du logiciel (organisation du système).

II.3.1.6.2 Matériel de rééducation traditionnel

Le matériel employé par les cliniciens en rééducation fait souvent appel à des méthodes audiovisuelles d'apprentissage pour petites classes ou de secondes langues : bandes dessinées, enregistrements magnétiques, textes, diapositives, jeux éducatifs, objets, etc. [LEC 79, TIS 88]. Transposé à l'utilisation d'un micro-ordinateur, cela sous entend de faire appel à plusieurs sources d'information ou médias. Ce n'est d'ailleurs pas une surprise car il va sans dire que pour être utilisable par un grand nombre de personnes, un programme d'évaluation ou de rééducation assistée par ordinateur de patients aphasiques doit tenir compte des besoins et des habitudes des malades qui varient d'un sujet à l'autre. Le ou les logiciels destinés à cet usage doivent donc à priori concerner l'ensemble des modalités du langage à l'image des troubles occasionnés par l'aphasie.

Il faut donc que l'ordinateur puisse écrire et parler, mais aussi qu'il sache lire et comprendre ce que dit le malade et ce n'est pas si simple, même si aujourd'hui le multimédia est à la mode et que les recherches en communication en langage naturel battent leur plein.

II.3.1.6.3 Les organes d'entrée et de sortie à envisager

II.3.1.6.3.1. Entrée manuelle

Il existe de nombreux moyens pour entrer des données dans un système basé sur un micro-ordinateur de type P.C.. On trouve notamment les claviers informatiques classiques, les pavés alphanumériques, les crayons optiques, les manettes de jeu, les souris et leurs homologues fixes que sont les boules roulantes de positionnement et les écrans tactiles [HARD 94]. A côté de ces périphériques standards, on peut aussi avoir recours à des interfaces munies de boutons poussoirs et à des périphériques plus marginaux comme les tablettes graphiques et les scanners.

Tous ces systèmes n'ont ni les mêmes possibilités ni les mêmes objectifs. Habituellement, on distingue quatre fonctions principales d'entrée d'information :

- écriture de texte (identité, réponse en toutes lettres, commentaire...),
- entrée de données numériques (paramétrage, sélection dans un menu...),
- pointage sur une zone de l'écran,
- sélection d'une zone de l'écran.

Chacun des moyens d'entrée décrits plus haut répond plus ou moins bien à une ou plusieurs de ces fonctions. Par exemple, un clavier informatique standard permet parfaitement d'entrer du texte ou des valeurs numériques, c'est son but premier. Il sera par contre moins bien adapté qu'une souris ou une boule roulante pour, par exemple, sélectionner une zone de l'écran, dans laquelle il faudra ensuite sélectionner une fonction ou une option.

Le tableau II.2 nous donne un aperçu des différents périphériques utilisables pour réaliser les quatre fonctions que nous venons de voir :

- les claviers semblent être un bon compromis, même si le pointage et la sélection n'est pas leur fort. Ils ont aussi le désagrément de comporter beaucoup de touches (102 en général) qui sont autant de sources d'erreur et impliquent un apprentissage très long, même pour une frappe de type "gendarme". Mais, à ceux pour qui l'écriture manuscrite pose un problème sans que la reconnaissance des lettres soit affectée, il procure une aide non négligeable. Encore faut-il que le patient soit capable d'assembler les lettres pour former le mot (ou la phrase) qu'il désire produire,
- les opérations de pointage et de sélection sont plutôt réservées aux souris, devenues aujourd'hui indispensables dès lors que l'interface utilisateur est graphique,
- les écrans tactiles sont eux aussi un bon compromis car polyvalents. L'immense avantage qu'ils procurent est de limiter le matériel périphérique à l'écran puisque

c'est l'écran lui-même qui est doté des caractéristiques nécessaires à l'entrée des informations,

- en marge de ces matériels, les manches à balai (*joysticks* en anglais) ou manettes de jeu sont plutôt réservées à cet effet (jeu),
- pour finir, nous aborderons le cas des boutons poussoirs. Ceux-ci sont employés en nombre très limité et réservés à des applications de sélection ou à choix multiple. Ils sont néanmoins bien adaptés à des malades à motricité réduite ou qui n'ont dans leur grande majorité jamais utilisé d'ordinateur, et qui par crainte de cet outil, peuvent aller jusqu'au refus pur et simple d'y toucher.

L'entrée d'informations manuscrites doit également être envisagée. Comme nous l'avons vu plus haut, l'entrée de texte dans la machine par l'intermédiaire du clavier ne procède pas de la même démarche que l'emploi d'un stylo. Introduire un texte manuscrit dans un ordinateur est une opération aujourd'hui réalisable directement par l'intermédiaire d'une tablette graphique comme le fait le "Handtop 386" que commercialise la société française E.C.I. et éventuellement par l'intermédiaire d'un écran tactile ou indirectement en utilisant un scanner. En analysant la page graphique obtenue (analyse matricielle, morphologique, ou par réseau de neurones [HARD 94]), on peut alors identifier dans de bonnes conditions le message fourni par le malade dans un temps plus ou moins long. Dès lors, on se trouve dans le même contexte que l'entrée de texte par clavier, donc avec les mêmes problèmes d'analyse du langage (jargon, agrammatisme, manque du mot), à la différence que la patient a écrit son texte à l'aide d'un stylo, comme il a l'habitude de le faire.

L'utilisation d'une tablette graphique permet d'évaluer les troubles du graphismes et de réaliser notamment de la copie de mots rattachés à des concepts simples et concrets associés à des objets, situations, actions présentées graphiquement.

Mais quelque soit le moyen de communication employé, il faut toujours tenir compte du niveau scolaire du malade et de ses habitudes d'écriture [LEC 79].

Périphérique	Fonction	Texte	Données numériques	Pointer	Sélectionner
Clavier		●	●	●	●
Pavé numérique			●		
Crayon optique		●	●	●	●
Manette de jeu				●	●
Souris / Boule roulante				●	●
Boutons poussoirs				●	●
Ecran tactile		●	●	●	●

● RECOMMANDE ● POSSIBLE

Figure II.2 : Périphériques recommandés pour les quatre fonctions d'entrée principales.

II.3.1.6.3.2 Reconnaissance de la parole

Contrairement à l'homme, l'ordinateur apprend à écouter et à parler après avoir appris à lire et à écrire. Les problèmes liés à cette importante fonction de communication sont beaucoup plus complexes. L'introduction de la reconnaissance de la parole reste encore difficilement envisageable à l'heure actuelle dans une application quelle qu'elle soit et a fortiori à destination d'aphasiques, même si I.B.M. vient de présenter son "système de dictée personnelle" dont les résultats sont tout bonnement étonnants (essai dans [PIC 94]).

Ces systèmes présentent de nombreuses difficultés, car même si le signal acoustique est parfaitement intelligible, plusieurs paramètres linguistiques entrent en jeu :

- *phonétique* : le son est-il un mot ou une parcelle de mot ?
- *sémantique* : quel est le sens de ce mot ?
- *syntaxique* : où le mot est-il placé dans la phrase ?

Chacun de ces paramètres masque des problèmes spécifiques, liés à la prononciation, à la vitesse d'élocution et même à l'état des différents locuteurs sachant que l'ordinateur ne peut comparer ce qu'il entend qu'à une bibliothèque mémorisée au préalable. Il est donc nécessaire d'effectuer un apprentissage particulièrement long de la voix de l'utilisateur. Pour cela, on lui demande de lire une ensemble de phrases en employant une diction hachée afin de séparer parfaitement les mots. C'est là une tâche difficilement envisageable avec les patients aphasiques.

L'emploi d'outils de reconnaissance et de synthèse vocale permet dans des limites raisonnables d'envisager l'évaluation voire le traitement des productions linguistiques appauvries et peu abondantes de l'aphasique de Broca (le faire parler) ou abondantes pour ne pas dire logorrhéiques et jargonaphasiques de l'aphasique de Wernicke (le faire taire et l'amener à produire un langage par gestes) et des troubles phonémiques (désintégration phonétique : énonciation laborieuse et perturbée, paraphasies phonémiques : transformations de mots par omissions, ajouts, déplacements et remplacements phonémiques) de l'aphasique de conduction.

II.3.1.6.4 Les organes de sortie

II.3.1.6.4.1 Sortie écrite

Les principaux organes de sortie de textes et de graphismes d'un micro-ordinateur sont l'écran et l'imprimante. L'écran est l'indispensable moyen de communication utilisé par la totalité ou presque des logiciels et nous ne nous étendrons pas davantage à son sujet.

II.3.1.6.4.2 Production de parole

La production de parole est plus rarement employée. Il convient de distinguer sortie vocale et sortie son.

Il existe plusieurs techniques de synthèse vocale, basées sur une analyse des sons et des propriétés de l'oreille humaine (vocoder) ou sur le modèle de l'appareil vocal humain (synthèse par formants et prédiction linéaire).

Lorsque l'on désire reconstituer de la parole, comme pour la reconnaissance vocale, les principales difficultés sont l'identification précise du signal acoustique et la nécessité de disposer d'un support magnétique sur lequel le message est stocké analogiquement ou alors d'une importante mémoire pour stocker numériquement le signal. Pour pallier cette dernière difficulté, on peut compresser le message avec l'inconvénient d'appauvrir le signal lequel comporte déjà un bruit dû à la numérisation. Le CD-ROM trouve ici tout son intérêt. Son application privilégiée, le CD audio en est la preuve. Sa grande capacité et sa bonne rapidité de transfert d'informations en font le moyen de communication privilégié de toute application multimédia tant pour la restitution de sons et de voix que pour l'animation graphique. Son utilisation est encore limitée pour des raisons de coût du matériel de gravure, mais il ne fait aucun doute qu'il s'agit là du meilleur moyen actuel de produire de la parole de qualité.

L'utilisation de la parole permet de stimuler le versant linguistique oral des troubles occasionnés par l'aphasie. Nous pensons notamment à des épreuves de répétition orale pour lesquelles l'ordinateur infatigable permet au malade de reproduire ou d'écouter invariablement le même message autant de fois qu'il le désire ou qu'il est nécessaire. Chez l'aphasique de Broca, cela peut lui permettre d'atténuer la tendance qu'ont ces malades d'évoluer vers l'agrammatisme. La production de la parole trouve aussi son intérêt chez l'aphasique de Wernicke et chez l'aphasique global qui présentent de sérieux troubles de la compréhension.

II.3.1.6.5 Gestion des entrées / sorties

II.3.1.6.5.1 Limiter les erreurs d'entrée

"Les gens font des erreurs, donc rendons le système insensible à ces erreurs" [NOR 88]. Afin de limiter au maximum les erreurs d'utilisation de l'interface utilisateur, mais aussi d'entrée des réponses du patient, il importe en premier lieu de :

- simplifier les entrées au maximum afin de ne pas surcharger mentalement le patient, dont les capacités de mémorisation à court terme sont limitées, par des manipulations difficiles ou fastidieuses,
- vérifier l'appartenance d'une entrée de l'opérateur à un ensemble d'entrées possibles. Dans le cas contraire, l'utilisateur doit être averti de son erreur et autorisé à faire une correction [SCA 86]. Toute action doit être réversible et doit

permettre la récupération des erreurs dans le but de minimiser les erreurs de l'utilisateur qui peuvent être interprétées chez le malade comme des erreurs dues à la pathologie et d'augmenter la fiabilité du système homme / machine.

Limiter les erreurs est une intention louable et l'utilisation de la souris et d'interfaces graphiques a notamment diminué le risque d'erreur lié à l'entrée d'une mauvaise sélection ou à l'usage d'une mauvaise combinaison de touches. Ce principe est important pour l'utilisateur, qu'il soit thérapeute en charge du choix des exercices à présenter au malade et à leur traitement, ou bien malade sollicité pour l'évaluation et la rééducation de ses troubles du langage. Cependant, en limitant l'entrée des informations à un acte gestuel, on restreint considérablement le champ de manœuvre et d'investigation du thérapeute : pas de reconnaissance directe de la parole ni du langage écrit.

II.3.1.6.5.2 Présentation de l'information

Le dialogue avec l'ordinateur est essentiellement écrit, c'est donc principalement par l'intermédiaire de l'écran que machine et utilisateur communiqueront. Comme il a été dit plus haut, l'information présentée doit être condensée au maximum, c'est à dire sans nuire à sa visualisation, à sa compréhension et à sa mémorisation.

zone la plus consultée	zone intermédiaire
zone intermédiaire	zone la moins consultée

Figure II.3: Partitionnement de l'écran selon quatre zones stratégiques. D'après [KOL 89].

COULEUR	EFFETS PERCUS
rouge	excitant
bleu	calmant
jaune	stimulant
vert	stabilité
magenta	métamorphose, passage
blanc	positif
noir	négation

Figure II.4 : effets perçus par l'opérateur en fonction de la couleur. Cité dans [KOL 89], d'après [PON 82].

Il est donc important de veiller à bien répartir les informations à l'écran et à faire en sorte qu'elles soient lisibles. On trouvera dans [KOL 89] un ensemble de recommandations telles que :

- le choix des polices et des tailles de caractères, pour lesquelles il faut éviter les écritures sophistiquées (gothique) ainsi que des tailles trop petites,

- la densité d'informations présentes à l'écran. Trop de blocs ou des blocs trop grands, et par conséquent des caractères de grande taille sont à proscrire,
- organiser spatialement les données (cf. Fig. II.3) pour que les informations les plus importantes apparaissent dans la zone la plus regardée de l'écran (coin supérieur gauche) et les moins importantes dans le coin inférieur droit, en tenant compte qu'un patient cérébro-lésé peut scruter une image sans orienter son regard de façon organisée vers les zones pertinentes de l'écran ou négliger une partie de l'écran (hémignégligence visuo-spatiale),
- grouper les données de même ordre et constituer des blocs entourés de cadres,
- différencier les classes par des couleurs différentes. Le nombre de couleurs choisies sera limité et dépendra de la densité d'informations à l'écran,
- les couleurs seront choisies en fonction de leur effet sur l'organisme (cf. Fig. II.4) et de la symbolisation qu'on leur attribue : rouge = danger, jaune = attention, vert = normal,
- les combinaisons de couleur (texte et couleur de fond) seront choisies afin d'avoir un contraste clair/sombre, sombre/clair ou compatible : éviter le rouge mêlé au bleu qui peut provoquer un effet de battement.

II.3.1.7 Conclusion

La prise en compte de concepts ergonomiques généraux contribue à augmenter les performances globales des malades et à les mettre dans les conditions d'utilisation les meilleures d'un outil qui leur est très rarement familier. L'interface utilisateur ne doit pas constituer une gêne ou un handicap supplémentaire, elle doit au contraire faciliter la tâche du malade. En diminuant la charge de travail des patients, nous leur permettons de se consacrer davantage à la tâche, et c'est bien là l'objectif principal.

Plus radicalement, on pourrait trier les patients de façon à "éliminer" les patients présentant une gêne vis-à-vis du système. Ce n'est bien évidemment pas une solution, l'outil doit s'adapter au malade et non le contraire. Reste qu'il y a des modalités du langage qui sont difficiles à traiter par informatique à l'heure actuelle.

II.3.2 L'expert

Le module expert d'un système d'E.I.A.O. est celui qui contient la connaissance du domaine et qui par conséquent a la capacité de résoudre les problèmes qu'il pose (ou qu'on lui pose) dans son domaine de prédilection. En évaluation et rééducation des troubles du langage, l'expert est celui qui est capable d'établir un diagnostic à partir d'un protocole d'examen construit à partir de connaissances très diverses (savoir et savoir-faire) et souvent complexes

(physiologiques, pathologiques, neurologiques, linguistiques, etc.) et donc capable de rattacher les comportements du malade à une pathologie, à un modèle. C'est aussi la personne qui à partir de ce constat est capable de construire un programme de rééducation des déficits du langage que présente ce malade. Les méthodes employées à cet égard sont multiples et présentées dans le chapitre I. L'expert et le pédagogue sont intrinsèquement liés et ce lien passe par la représentation pathologique de l'élève.

L'expert n'est cependant pas celui qui comptabilise les pourcentages de bonnes réponses et de mauvaises réponses. Cet aspect quantitatif du trouble donne une idée du tableau clinique et permet de dire le cas échéant que le malade éprouve des difficultés dans telle ou telle modalité du langage, mais ne permet pas de donner les raisons qui ont conduit le malade à produire ses réponses. L'expert doit être en mesure d'expliquer les productions des malades, c'est-à-dire être capable de comprendre la logique régissant leurs productions, saisir pourquoi un malade réussit telle épreuve, et pourquoi il échoue à telle autre. C'est une tâche difficile à réaliser, d'autant plus qu'il n'y a pas forcément de constance dans le comportement des malades. Ceux-ci sont capables parfois de produire des énoncés déviants par rapport au standard, et à l'inverse sont capables, mais ponctuellement, de produire des énoncés conformes avec les règles en usage. Parmi les productions des malades, il y a donc deux types d'erreurs : celles qui sont *systématisables* et qui représentent une faute d'usage (encore faut-il que cette faute soit commise à cause du trouble phasique, et qu'elle ne soit pas antérieure au trouble) et celles qui sont *aléatoires*. C'est donc plus qualitativement que quantitativement qu'il convient de décrire les erreurs du malade en tenant compte de variables telles que l'âge, le sexe et le niveau de scolarisation.

Les connaissances de l'expert, contrairement à un système d'E.I.A.O. "normal" ne représentent pas le fonctionnement normal du langage, mais le raisonnement pathologique attendu par le thérapeute [MAS 90].

II.3.3 Le pédagogue

II.3.3.1 Introduction

Une pédagogie peut être centrée sur le contenu à transmettre. Dans cette approche, on parle plus volontiers de stratégie d'enseignement (basée sur les connaissances du maître et leur transmission) que de stratégie d'apprentissage (basée sur les mécanismes psychologiques qui le rendent possible). Dans ce dernier cas, on considère une pédagogie centrée sur l'élève, qui tient compte de ses goûts, de ses intérêts et de son niveau de connaissance, en d'autres termes, il s'agit d'une pédagogie de l'apprentissage individualisé.

C'est dans cette perspective que doit se placer l'E.A.O., et davantage encore l'E.A.O. pour cérébro-lésés. Comme nous l'avons déjà signalé, il ne s'agit pas d'apporter des

connaissances nouvelles au malade ou de modifier les conduites qui étaient les siennes avant son aphasie. L'objectif pédagogique est de tenter de ramener le malade dans son état antérieur, avec tout ce que cela comporte comme difficultés quant à déterminer cet état. Sans prétendre manquer d'ambition, il est alors souhaitable de se limiter à des procédures simples, pour lesquelles on est en droit de supposer que les stratégies employées par le malade pour résoudre les exercices peuvent être déterminées et faire abstraction d'erreurs telles que les fautes d'orthographe ou de style qui n'empêchent pas le malade de se faire comprendre. C'est aussi savoir qu'il est difficile de rééduquer individuellement la totalité des troubles que présente le malade. Il faut que les aspects du langage traités puissent produire un transfert d'apprentissage ou à la limite empêcher l'aphasie d'évoluer défavorablement, comme c'est le cas lorsque l'on tente de limiter l'évolution d'un aphasique de Broca vers l'agrammatisme.

Individualiser l'apprentissage, c'est pouvoir choisir ce que l'on veut enseigner et adapter le cheminement pédagogique en fonction des réponses fournies par l'apprenant au cours de l'utilisation du didacticiel. En rééducation des troubles du langage, c'est le thérapeute qui décide rationnellement des exercices qu'il est nécessaire de proposer au malade en fonction des troubles qui ont été décelés chez celui-ci et dont on se servira pour établir le modèle de l'élève. Une modélisation rendue indispensable au regard des objectifs fixés.

Travailler avec un cérébro-lésé, c'est aussi savoir que ses réponses sont souvent entachées de doute, et qu'il faut laisser une marge de manœuvre au malade lui permettant de corriger ses erreurs. Ce qui ne veut pas dire que l'autocorrection des réponses le conduise à formuler des réponses exactes.

Et, quelle que soit la méthode employée, le renforcement des bonnes réponses, cher à l'enseignement programmé, est très important. C'est le signe pour le malade qu'il y a amélioration de ses résultats.

II.3.3.2 Moyens pédagogiques

En rééducation des aphasiques, pédagogie et rééducation sont intimement liées. Nous ne reviendrons ni sur les méthodes pédagogiques abordées dans l'annexe A qui concernent l'apprentissage développemental (et par extension, les méthodes rééducatives dites de "rétablissement"), ni sur les méthodes de rééducation dites de facilitation ou palliatives que nous avons abordées dans le premier chapitre. Nous dirons simplement que les méthodes pédagogiques utilisées par les thérapeutes font souvent appel aux méthodes d'enseignement utilisées pour les petites classes [LEC 79, TIS 88] (voir aussi A.5.4), ou pour l'enseignement d'une seconde langue. Et parmi les tuteurs permettant d'apprendre l'anglais, nous citerons pour exemple : E T (English Tutor) qui est de ceux qui procèdent à une modélisation du

raisonnement de l'apprenant pour l'apprentissage de cette seconde langue [TAS 92] et V.P.² (Verb-Particle and Verb-Prepositional) dont la particularité est de baser sa stratégie de correction sur la comparaison avec la grammaire de la langue maternelle [SCH 86].

L'utilisation de telles méthodes d'enseignement s'avère délicate car il est difficile d'établir une hiérarchie des apprentissages et de déterminer ce qui pour un cérébro-lésé paraît plus simple ou plus difficile. On assiste paradoxalement à des niveaux de performance qui ne sont pas fonction de l'ordre de progression chez le normal comme nous l'avons déjà signalé (cf. I.5.6.2). De ce fait, on se trouve confronté à nouveau aux dangers d'une planification des étapes à franchir selon un programme préétabli en fonction de stades de réacquisition basés sur ceux de l'acquisition.

Nous présenterons ici une méthode originale basée sur le "pourquoi cette erreur" et non pas sur le simple constat "il y a erreur dans tel et tel cas" : les grammaires élémentaires induites.

II.3.3.3 Les grammaires élémentaires induites [GUY 87]

Si on désire mettre au point une technique de rééducation de type stratégie de réorganisation, il convient en tout état de cause de déterminer les conduites employées par le malade et de l'encourager à utiliser celles qui sont les plus efficaces, et de le dissuader d'employer celles qui conduisent à des productions erronées.

Les grammaires élémentaires induites (G.E.I.) introduites par Guyard sont des petits exercices logiques basés sur la grammaire. Leur but est de tenter de mettre à jour les raisonnements utilisés par les malades à partir d'épreuves simples et élémentaires. Ces grammaires sont appelées induites parce que chacun des exercices présentés au malade est un support qui permet au clinicien de vérifier que la logique employée par le malade correspond bien à l'hypothèse formulée à partir des productions antérieures du malade.

Le principe de fonctionnement d'une G.E.I. consiste à demander au patient de résoudre un problème à trous suivant un modèle (cf. Fig. II.5). Pour déceler les failles de la logique du patient, il y a bien sûr un piège. Ce piège doit être construit en fonction des connaissances du malade (les mots de l'exercice doivent appartenir au vocabulaire du malade afin de distinguer une faute pathologique d'une faute d'usage) et suppose que le malade est capable de recourir à deux processus grammaticaux différents : un processus dérivationnel permettant la formation d'un mot nouveau par agglutination d'un préfixe ou d'un suffixe à un radical (POMM + IER), puis un processus lexical permettant d'opposer deux radicaux entre eux (RAISIN / raisinier).

Les aphasiques ont une tendance à généraliser les processus logiques qui leurs restent accessibles. Dans l'exemple fourni, relatif au genre grammatical (le/la) et au rapport fruit/arbre, le thérapeute fait l'hypothèse que le malade ne dispose plus que du processus dérivationnel et qu'il sera incapable d'envisager la réponse raisin / vigne. La G.E.I. est donc construite dans ce sens et le malade tombe dans le piège comme nous pouvons le constater : il produit le nom de l'arbre fruitier donnant du raisin en généralisant le processus d'agglutination sur la base d'une similarité morphologique entre ces deux mots (*raisin/raisinier*), ce qui conforte le thérapeute dans son hypothèse sur le mode de raisonnement de son malade.

Dans ce type d'épreuves, le thérapeute ne systématise plus des performances aphasiques obtenues à des épreuves standard, bâties pour tous les malades, mais il tente d'établir à priori la nature des réponses à une batterie de tests construite à cet effet, espérant que les réponses effectivement produites par un malade correspondent à celles qu'il avait préalablement prévues. Lorsqu'une erreur est décelée, il est alors possible de vérifier sa systématisme par l'intermédiaire d'une épreuve complémentaire où les pièges s'articuleront autour d'elle.

LA	POMME	/	LE	POMMIER		la	BANANE	/	le	bananier
la	POIRE	/	le	poirier		la	PRUNE	/	le	prunier
la	CERISE	/	le	cerisier		la	PECHE	/	le	pêcher
la	RAISIN	/	le	raisinier		l'	ORANGE	/	l'	orangier

Le problème posé est en majuscules et les réponses du malade sont en minuscules

Figure II.5 : Exemple de grammaire élémentaire induite. D'après [GUY 87].

La réalisation d'un programme d'étude basé sur une G.E.I. est un travail d'investigation. Il faut être capable de relancer en permanence l'observation en fonction des données apportées par le malade. Pour réaliser un tel système sur ordinateur, la difficulté consiste à bâtir des protocoles qui sont présentés en fonction de ce qu'on attend du patient et qui permettent de réagir en fonction de sa réponse. C'est une tâche difficile à réaliser car contrairement au sujet normal, le raisonnement pathologique du malade peut revêtir de nombreux aspects qu'il ne suffit pas d'observer, mais qu'il faut expliquer et vérifier. La programmation d'un tel système est donc susceptible d'être modifiée fréquemment, du moins à chaque fois qu'un malade apporte une information nouvelle. Il faut donc envisager une structure suffisamment souple (emploi d'outils d'intelligence artificielle) qui permette d'augmenter les connaissances du système sans remettre en cause son fonctionnement antérieur. De plus, si l'erreur est la manifestation d'un trouble, son absence ne signifie pas forcément l'inverse. L'absence d'erreur peut signifier que la question posée n'était pas celle qui aurait permis d'isoler le trouble. Il faut donc pouvoir revenir sur des hypothèses ou savoir les reformuler.

II.3.3.4 Le comportement d'autocorrection chez l'aphasique

Selon Hannequin et Mihout : "le comportement d'autocorrection est celui adopté spontanément par le patient aphasique quand, pour un item-cible donné il modifie une production (erronée)" [HAN 84].

En fait, il faudrait ajouter erronée du point de vue du malade, car l'aphasique corrige aussi bien des erreurs que des productions qui du point de vue de l'examineur sont des bonnes réponses. Ce comportement de doute est aussi induit lorsque le temps laissé au patient pour répondre est trop important (manque de spontanéité) et pose le problème de la conscience du trouble chez l'aphasique et de manque du mot qui peut se traduire par le besoin du malade d'être souvent rassuré par le thérapeute : "c'est pas tellement utilisé ! Qu'est ce que vous en pensez ?" ; "Croyez-vous qu'il faut deux "n" ?" ; "Vous dites non, vous aussi, n'est-ce pas ?"

Le doute ne se manifeste pas forcément par une correction : Guyard [GUY 87] rapporte le cas d'un aphasique de Broca qui présentait des réponses écrites qui ne correspondaient pas à ses réponses orales et correctes. Sensibilisé par la nature incertaine du résultat, ce malade précisait qu'il ne s'agissait sûrement pas de la réponse mais que sa production "était presque pareille" (production d'articles : "du" écrit à la place de "le").

En pratique, l'autocorrection se manifeste aussi bien par des comportements verbaux ou écrits que par des comportements gestuels, plus difficiles à déceler par l'intermédiaire d'une machine.

Elle peut aussi avoir lieu après avoir validé une réponse lorsque l'on demande au malade de juger sa réponse ("bonne", "mauvaise", "je ne sais pas"), car de nombreux aphasiques restent capables d'apprécier le caractère inacceptable de leurs performances, même s'ils demeurent impuissants à les corriger : "Il reste chez l'aphasique la capacité de contrôler ses performances alors qu'il ne peut plus les analyser logiquement, donc de systématiser ses productions" [GUY 87].

L'autocorrection peut être une stratégie employée par le thérapeute pour amener les patients à corriger leurs difficultés lorsqu'il n'est pas possible de leur expliquer directement leur raisonnement pathologique, ni de leur restituer un raisonnement correct. Sachant que les malades ont tendance à effectuer des déductions, certes logiques mais abusives, il peut être intéressant de les amener à comparer leurs productions, éloignées du normal, à d'autres qui leurs sont plus familières. Les malades sont toujours capables de comparer leurs productions avec des éléments résiduels qu'ils ont conservé en mémoire. En se rendant compte de leur erreur, les malades seront réticents à systématiser des raisonnements qui les conduisent à

produire des réponses incorrectes comme celle que nous avons relevée dans l'exemple de la figure II.5.

II.3.4 Le modèle de l'élève

II.3.4.1 Introduction

Le tuteur doit être capable de déterminer les stratégies employées par un élève en observant son comportement lorsque par exemple, il résout un problème. Et pour décider quelles caractéristiques du comportement de l'élève sont significatives, encore faut-il que le système ait une représentation interne, souvent implicite des mécanismes sous-jacents et des concepts nécessaires pour mener à bien une tâche. Le système doit par la même, être capable d'expliquer la démarche utilisée par le malade.

La modélisation de l'élève est essentielle pour adapter la rééducation à son cas et passe par l'explication de la faute ou du comportement. C'est une tâche difficile, car des aphasiques de type différent (Broca, Wernicke, conduction, etc.) peuvent produire les mêmes fautes, alors que la déductivité de l'un n'est pas forcément celle de l'autre : **un même symptôme peut avoir des causes différentes**. Comme le dit Guyard : "Tous les aphasiques produisent des fautes du type "le montre" ou "la timbre"... mais le mode de production est différent d'un type d'aphasie à l'autre" [GUY 87]. On peut d'ailleurs ajouter qu'il n'y a pas autant de troubles phasiques que de symptômes observés, comme pourrait le laisser croire une étude quantitative. L'explication, en recherchant la logique interne des performances des malades permet alors de trouver le ou les liens qui unissent différents symptômes sachant que la perte d'un processus logique peut entraîner un panel de fautes très étendu.

Pour ce faire, outre les considérations de Self (cf. III.4.4.3), nous avons à notre disposition plusieurs types de modélisation de l'élève dont : le modèle de *connaissance partielle*, le modèle *différentiel* et le modèle *prédictif*.

II.3.4.2 Exemples de modélisations de l'élève

II.3.4.2.1 Le modèle de connaissance partielle

Dans le modèle de connaissance partielle (en anglais *Overlay model*), les connaissances de l'étudiant sont considérées comme étant un sous-ensemble des connaissances de l'expert. L'apprentissage consiste alors à lui prodiguer un enseignement visant à compléter ses connaissances [GOL 77].

Il faut éviter de tomber dans le piège de comparer les patients à un modèle idéal de l'élève que serait un sujet sain et donc de dire que les erreurs du malade correspondent à des manques de connaissances. ce qui n'est pas le cas. Il ne faut pas partir du normal pour décrire

le pathologique mais effectuer le parcours inverse : "c'est la pathologie grâce aux dissociations qu'elle présente qui fournit la possibilité de constituer un modèle du normal" [GUY 87].

Il n'est pas davantage possible de considérer l'élève modèle comme un aphasique type, qu'il soit de Broca, de Wernicke ou de conduction. Si des distinctions telles que des troubles lexicaux ou syntaxiques sont observées chez l'une ou l'autre de ces populations, chaque malade est un cas particulier qui n'entre pas un cadre rigide et formel. L'emploi d'une modélisation de ce type s'avère contre-indiquée dans le cas présent.

II.3.4.2.2 Le modèle différentiel [BUR 82]

Le modèle différentiel tolère que les connaissances de l'élève puissent comporter des erreurs, des faiblesses. Dans cette approche, le système est capable de représenter des connaissances qui sont différentes des siennes, capable d'élaborer les stratégies employées par l'apprenant à partir de l'interprétation de ses erreurs. L'apprentissage consiste alors à éliminer ou à rectifier les connaissances erronées sans demander à l'apprenant d'explicitement totalement les démarches employées.

C'est une situation que l'on rencontre avec les patients aphasiques. Il faut modéliser les stratégies du malade qui peuvent être organisées comme des déviations de règles standard, à l'image des transformations de mots observées dans le cas de paraphasies phonémiques : omissions, ajouts, déplacements et remplacements phonémiques (cf. I.3.3.1.4), ou de transformations de règles syntaxiques : omissions, généralisations, substitutions, inversions, adjonctions, etc. [DEL 86]. Et, dans le cas présent, il est impossible de demander au patient la stratégie qu'il emploie. Cela ne peut être fait qu'en émettant des hypothèses à ce sujet et en les vérifiant. On espère dans ces conditions mettre à jour les processus logiques certes, mais erronés qui sont employés par le malade.

II.3.4.2.3 Le modèle prédictif [TAS 92]

Le modèle prédictif ne compare pas simplement le comportement de l'apprenant à un comportement idéal, mais à un comportement attendu. Le raisonnement attendu est réalisé par une simulation qui tient compte des données présentes dans le modèle de l'élève à cet instant. Cela suppose qu'il faille envisager de modifier ce modèle à chaque pas de l'interaction entre l'apprenant et la machine si l'élève ne réagit pas comme prévu : immédiatement si le comportement de l'élève apporte une information nouvelle, plus tard si le système vérifie de multiples hypothèses. Cette façon de procéder est utilisée par Guyard [GUY 87] et Masson [MAS 88] dans l'élaboration des G.E.I..

L'emploi d'une telle modélisation nécessite d'utiliser des moyens de réalisation souples car les logiques "perturbées" de chaque patient sont différentes. Il faut à chaque pas pouvoir inférer de nouvelles hypothèses en fonction des réponses des malades, et donc pouvoir les intégrer au système sans le remettre fondamentalement en cause.

II.4 Expériences de rééducation par ordinateur

II.4.1 Introduction

Malgré des possibilités de dialogue encore souvent limitées au sempiternel trio clavier-écran-souris, le champ d'application de l'ordinateur en thérapie des troubles du langage reste très étendu, comme en témoigne son utilisation en constante augmentation.

Comme pour l'E.A.O. traditionnel, c'est l'avènement des micro-ordinateurs domestiques qui a rendu cet essor possible. Bon nombre d'applications ont été développées depuis une quinzaine d'années maintenant sur des produits de type Apple2 ou McIntosh ou sur compatibles P.C. [MAS 88, KAT 87, GUY 90a, GUY 90b, DEL 90, PARTZ 94].

Au départ, l'utilisation d'un micro-ordinateur était vue comme un moyen d'augmenter le nombre de stimulations que pouvait recevoir un patient avec des conditions d'expérimentation invariables dans le temps. C'était bénéfique pour le malade puisque plus ce nombre est important, plus le patient peut progresser.

Il est bien sûr possible d'aller plus loin. Le micro-ordinateur est un moyen qui permet aux thérapeutes de proposer des programmes de rééducation bien plus adaptés aux malades, comme ils tentent de le faire à l'aide des nouvelles méthodes de rééducation qui ont vu le jour ces dernières années. La difficulté n'est toutefois pas la même que lors de l'utilisation de méthodes de revalidation encore couramment employées, puisqu'il s'agit de comprendre pourquoi une erreur a lieu et non pas se contenter de voir qu'il y a une erreur et de matraquer le malade d'exercices jusqu'à ce qu'elle disparaisse. L'expérience menée à Rennes par Guyard et ses collaborateurs est une belle illustration de cette nouvelle vague.

Les exemples qui suivent résument les essais qui ont eu lieu ces dernières années et on ne peut s'empêcher de faire un parallèle avec l'E.A.O. et l'E.I.A.O. traditionnels.

II.4.2 Compréhension orale

La rééducation de l'aphasie concerne souvent la compréhension du langage oral. Katz [KAT 87], rapporte une expérience informatisée dans ce domaine. On assiste ici à l'exemple le plus frappant de l'utilisation de l'ordinateur comme d'un perroquet. Son seul intérêt était de

permettre au malade de réécouter le message de l'exercice autant de fois qu'il le désirait sans autre information de retour que la nature de sa réponse (bonne ou mauvaise).

Une telle utilisation se passe de commentaires. Ce n'était pourtant pas la technologie qui était en cause puisque la restitution du message oral était de bonne qualité. Disons seulement qu'il manquait un indispensable cadre théorique à cette méthode typée conditionnement opérant, qui se manifestait pourtant par une amélioration des performances, mais à quel prix.

II.4.3 Production orale

Katz rapporte également le cas d'une expérience de production orale. Cette étude fut réalisée avec des patients qui avaient du mal à se souvenir des mots quand ils parlaient. Lorsque les patients avaient des difficultés à se souvenir d'un mot, ils pouvaient faire appel à un micro-ordinateur pour les aider à retrouver ce mot. La démarche de l'ordinateur était simple et consistait à poser des questions à l'utilisateur au sujet de ce mot (vous souvenez-vous de la première lettre de ce mot ?, de la dernière ?, d'autres lettres ?, de mots apparentés ?). Puis, en analysant les réponses, l'ordinateur effectuait une recherche dans un dictionnaire et proposait le ou les mots possibles, que le patient pouvait écouter par l'intermédiaire d'un synthétiseur de parole.

L'intérêt de cette application était d'inculquer au patient la méthode de recherche des mots et les questions qu'il avait à se poser en cas de difficulté. Ici encore, on assiste à un conditionnement, dont le seul intérêt est de soulager le thérapeute d'une thérapie rébarbative.

II.4.4 Compréhension écrite

Une réalisation de Katz en 1982 [KAT 82] dans le domaine de la lecture franchissait une étape puisqu'il s'agissait dans ce programme de proposer des épreuves de difficulté croissante en fonction des capacités du malade et de leur laisser une autonomie plus importante dans leurs jugements et prises de décision.

II.4.5 Production écrite

L'utilisation de l'ordinateur pour réaliser des productions écrites s'avère parfaitement indiqué, c'est là le moyen de communication privilégié avec cet outil. Des expériences dans le domaine ont été tentées, notamment par l'intermédiaire de Seron et Deloche [KATZ 82] : il s'agissait pour le patient, après avoir bénéficié d'un apprentissage du clavier, de taper des mots qui lui étaient communiqués oralement par le thérapeute. A la manière d'un mastermind, les lettres bien placées ou qui apparaissaient dans le mot étaient affichées. Les auteurs ont observé là aussi une amélioration des performances.

II.4.6 Dénomination d'images

L'utilisation de l'ordinateur en dénomination d'images est simple à mettre en oeuvre : on affiche des images et le malade doit taper au clavier le nom de l'objet représenté. Plus que l'environnement, c'est ici la méthode de rééducation employée qui importe. L'expérience que nous relatons [DEL 90], employée chez des aphasiques adultes utilise une batterie d'examen standardisée et repose sur la méthode suivante :

- un pré-test et un post-test sont administrés afin d'une part de situer exactement la nature et l'étendue du trouble, et d'autre part d'évaluer l'amélioration des performances,
- la rééducation porte sur un ensemble d'items répartis en groupes que le patient voit défiler à plusieurs reprises avec à chaque fois une aide (ou facilitation) différente,
- **le thérapeute a la possibilité de sélectionner lui-même les items** à proposer au patient, afin d'adapter le programme de rééducation au malade.

Les résultats observés laissent apparaître des améliorations des performances. Parmi les facteurs susceptibles d'en être responsables sont cités les apports des facilitations. Toutes n'ont pas eu la même influence, ainsi :

- fournir l'anagramme du nom de l'objet fut plus efficace que de fournir la première syllabe,
- fournir la première lettre, le genre ou un cadre à trous n'a eu que peu d'effet.

Ces résultats permettent aux auteurs de confirmer le fait que les procédures morphologiques ont une influence positive immédiate plus nette que les procédures sémantiques, mais que ces dernières ont un effet plus résistant à long terme.

II.4.7 Genre grammatical

Ici encore, l'expérience menée sur micro-ordinateur est proche de l'action menée par le thérapeute. Elle concerne le genre grammatical [GUY 87] et comprend des exercices tels que celui présenté figure II.5. La différence avec les autres exemples cités se situe au niveau de la méthode de rééducation employée. Elle est au service du malade mais aussi au service du thérapeute dans l'amélioration de ses connaissances sur le trouble. Pour arriver à leurs fins, les créateurs de ce système ont employé des techniques d'intelligence artificielle. On n'a plus une structure rigide, même si les auteurs des logiciels vus ci-dessus s'en défendent en prétendant que leurs systèmes peuvent être adaptés à leurs malades (c'est le thérapeute qui choisit les exercices par avance). Ici, un ensemble de règles modèle la théorie du linguiste et un modèle de l'élève (modèle différentiel) mis à jour à chaque instant permet d'utiliser la connaissance de

l'expert de façon adéquate comme le ferait un tuteur intelligent. Ce système crée lui même les exercices par l'intermédiaire d'un générateur d'énoncés [MAS 88, GUY 90a].

De cette façon, le système est capable de diagnostiquer les erreurs du malade, de proposer des hypothèses sur la nature de ces erreurs et de proposer des stratégies pour permettre au patient de corriger ses erreurs. A chaque pas, le générateur d'exercices crée une G.E.I. à cet effet.

II.4.8 Conclusion

A la vue des exemples cités ci-dessus, une conclusion s'impose : il est indispensable de doter le système d'un cadre théorique si l'on désire agir efficacement. Encore faut-il savoir ce qu'on appelle efficacité de la thérapie. Est-ce observer une amélioration des performances au bout d'un certain temps, même si la méthode n'est qu'une longue rengaine d'exercices identiques ? Ou est-ce optimiser la durée et le déroulement de la thérapie en l'adaptant au malade.

C'est certainement dans cette dernière optique qu'il faut s'engager, mais ce n'est pas simple. On assiste alors à des solutions qui font plus ou moins intervenir le thérapeute (ci dessus : dénomination d'images, genre grammatical) et pour lesquelles l'approche thérapeutique est différente (revalidation, réorganisation des processus sous-jacents).

Plus encore que les contraintes techniques (qui s'estompent progressivement, même si on est loin d'avoir résolu les problèmes de communication en langage naturel écrit ou oral), c'est la compréhension de la nature des troubles qui pose problème. L'intelligence artificielle déjà introduite en rééducation [GUY 90b] est aujourd'hui le meilleur moyen de modéliser le comportement humain. Cela permet au clinicien de simuler les modèles qu'il élabore et au thérapeute d'adapter les programmes de rééducation à ses malades et de prédire leurs comportements. Si cette anticipation se vérifie, il y a alors tout lieu de penser en temps réel que le programme porte ses fruits.

Il faut également tenir compte d'autres caractéristiques comme :

- la grande lenteur d'apprentissage dont font preuve les malades. Pas question dans ces conditions d'apercevoir rapidement des progrès significatifs,
- une courbe d'apprentissage très irrégulière (variabilité de la performance) qui peut parfois conduire à revenir soit à un niveau juste inférieur à celui que le malade a passé avec succès, soit à reprendre le programme au niveau le plus bas [BRU 86],
- un taux d'erreurs supérieur que chez le normal, ce qui ne surprend pas, on parle même de persévération dans l'erreur à l'image des observations effectuées lors de

lésions frontales : désorganisation du S.A.S. amenant le malade à ne plus être en mesure d'arrêter ou de modifier une conduite qui s'avère être incorrecte [BAD 93],

- une grande variabilité des performances en fonctions de la lésion (nature et gravité).

Tout cela se manifeste par des thérapies qui peuvent se dérouler durant plusieurs années.

II.5 Conclusion

La neuropsychologie cognitive permet chaque jour de comprendre davantage le fonctionnement cognitif humain, ce qui conduit à développer des pratiques thérapeutiques mieux adaptées aux déficits que présentent les patients. L'objectif n'est pas ici de remplacer le clinicien par une machine, mais comme c'est le cas en E.I.A.O. de lui fournir une aide substantielle dans ses moyens d'investigation (simulation de modèles et évaluation de patients) et de traitement. Une meilleure connaissance des processus encore valides et perdus chez chaque malade pourrait également permettre à la machine de corriger leurs productions et ainsi leur donner une forme acceptable ("prothèse linguistique") [MAS 90].

Pour l'instant, les patients qui peuvent utiliser ces programmes sont en nombre limité. Ces limites doivent être repoussées afin que demain des malades de plus en plus gravement atteints puissent bénéficier de ces traitements. Pour cela, la recherche en neuropsychologie a encore d'énormes découvertes à réaliser, et derrière elle c'est l'ensemble des sciences cognitives qui doit y participer, sans oublier la technologie des médias qui est le lien direct entre la machine et l'utilisateur.

Chapitre III

LES TROUBLES DU CALCUL ET DU TRAITEMENT DES NOMBRES

III.1 Historique

III.1.1 Introduction

Compter, additionner, soustraire, multiplier et diviser sont des capacités dont il est important de disposer dans notre société si l'on veut se servir de l'argent ou d'instruments de mesure. Si savoir calculer est important, être en mesure de traiter les nombres, les comprendre ou les exprimer oralement et par écrit l'est aussi sinon davantage. Or, ces capacités peuvent être altérées lors de l'apparition d'une lésion cérébrale. Depuis la parution des travaux réalisés par Henschen en 1919, nous savons premièrement que les troubles du calcul doivent être dissociés des troubles du langage et deuxièmement qu'une lésion cérébrale peut sélectivement abolir la capacité de calculer ou d'appréhender les nombres en dehors de l'aphasie. A l'image des troubles du langage, les troubles du calcul et du traitement des nombres sont très diversifiés comme l'illustre d'une certaine manière l'observation suivante réalisée par Benson et Denckla chez une patiente qui avait des difficultés à produire les réponses à des calculs par écrit ou par oral [BEN 69] : lorsqu'on demanda à cette patiente de résoudre le problème « 4+5 », cette personne répondit « huit », écrivit « 5 » et choisit « 9 » dans une liste de réponses possibles. Elle produisit des noms de nombres et des réponses écrites incorrectes, par contre elle était en mesure de sélectionner la bonne réponse à un calcul donné.

Le traitement thérapeutique des troubles du calcul comme le traitement des troubles du langage nécessite lui aussi de disposer de représentations permettant de réaliser une localisation anatomique des lésions entraînant des altérations du calcul et du traitement des nombres, mais aussi fonctionnelle afin de pouvoir identifier les différents mécanismes de traitement de l'information impliqués dans ces tâches ainsi que les liens qui les rattachent. Pour cela, il est indispensable de recourir à des batteries d'évaluation des troubles du calcul fiables et performantes telles que la batterie standardisée EC301 [EC 301].

Dans ce chapitre, après avoir présenté un bref historique des travaux effectués par les pionniers de la recherche sur l'acalculie, nous évoquerons le nombre telle qu'il apparaît actuellement dans le système L.A.R.A., c'est-à-dire sous sa forme verbale écrite. Puis, nous consacrerons une part importante de ce chapitre aux différentes représentations et modèles établis par les neuropsychologues lors de ces dix dernières années. Enfin, nous terminerons ce chapitre par la présentation de méthodes de rééducation des troubles du calcul et du traitement

chapitre par la présentation de méthodes de rééducation des troubles du calcul et du traitement des nombres qui ont porté leurs fruits chez le cérébro-lésé et par extension chez l'adolescent en difficulté.

III.1.2 Approche anatomo-clinique

La première grande étude sur les troubles du calcul a donc été réalisée par Henschen [HEN 19]. Après avoir examiné 372 cas, celui-ci observa que les troubles du calcul s'accompagnaient fréquemment, mais pas nécessairement, de troubles du langage ou de la lecture. En se basant sur ces dissociations, Henschen affirma qu'il était possible d'isoler une atteinte sélective du calcul, qu'il appela l'*acalculie* et qui regroupait trois troubles dissociés : un trouble de la lecture, un trouble de l'écriture et un trouble de la production orale des chiffres.

En 1961, une autre grande étude a été réalisée par Hécaen et ses collaborateurs [HEC 61] à partir de l'observation de 183 patients. Cette étude a permis d'établir une autre classification des troubles du calcul qui sert encore souvent de référence aujourd'hui [SER 94b]. Cette classification qui comprend elle aussi trois catégories :

- l'*acalculie aphasique*, dans laquelle il y a prédominance des troubles de la lecture et de l'écriture des nombres, liés ou non à une alexie et/ou une agraphie verbale,
- l'*acalculie spatiale*, dans laquelle il y a prédominance des troubles de l'organisation spatiale des nombres (position et ordre des chiffres non respectés),
- l'anarithmétique, où les patients présentent des troubles dans l'utilisation des opérations arithmétiques (calcul mental ou écrit).

Cette classification tripartite se base sur l'hypothèse que le calcul et le traitement des nombres impliquent trois capacités dissociées : une capacité à lire et à écrire les nombres, une capacité spatiale et une capacité de calculer.

Cependant, ces classes sont trop générales et ne permettent pas de discriminer suffisamment la grande diversité des troubles observés chez les patients cérébro-lésés [McCL 87] : une anarithmétique peut dominer le tableau clinique, mais elle peut aussi s'accompagner d'une *acalculie spatiale*.

Avec ces deux classifications, Henschen d'une part et Hécaen et coll. d'autre part ont voulu, par une approche anatomo-clinique, décrire les troubles du calcul et tenter de leur attribuer une localisation cérébrale, au détriment de l'élaboration d'un modèle général qui permettrait de rendre compte des mécanismes mis en jeu dans ces activités.

III.1.3 Approche cognitive

Un problème crucial pour les linguistes est de comprendre les procédés mentaux impliqués dans les activités langagières : au début des années 1980, les travaux sur le calcul prennent une orientation cognitive dans le but d'établir un modèle cognitif des mécanismes impliqués dans le calcul et le traitement des nombres et de leur organisation. Modèle de fonctionnement dans lequel la perturbation d'un mécanisme précis devrait entraîner un déficit précis et reproductible, ce qui permettrait d'interpréter les troubles observés chez les malades acalculiques. Warrington [WAR 82], Deloche et Seron [DEL 82a, 82b, SER 83, SER 84] sont les précurseurs dans ce domaine. Leurs travaux sont à l'origine de plusieurs modèles, dont le plus général est celui de McCloskey et coll., qui ont la particularité d'être simples sinon simplifiés et théoriquement très différents, preuve qu'il reste encore beaucoup de travail à effectuer dans cette discipline naissante.

III.2 Représentations écrites des nombres

III.2.1 Un panel étendu de représentations

Les nombres peuvent être représentés à l'écrit de différentes façons à l'aide de pictogrammes, de chiffres, de lettres ou de mots. Les représentations les plus employées de nos jours sont les chiffres Arabes (ex: 4) parce que très bien adaptés au calcul arithmétique et leur pendant graphémique les "mots-nombres" (quatre) reliés à la représentation sonore (/ katr /) de ces chiffres.

III.2.2 Un nombre limité de signes quel que soit la représentation employée

Une des particularités des systèmes de numération quels qu'ils soient, est d'utiliser un nombre limité de symboles pour représenter l'ensemble des quantités. Ces symboles sont souvent en rapport avec la base décimale connue depuis l'antiquité du fait de son rattachement évident au physique de l'homme (dix doigts).

L'abandon d'une représentation par collections de pictogrammes pour une représentation positionnelle par chiffres a marqué un progrès décisif, notamment pour réaliser des calculs arithmétiques écrits.

III.2.3 Vers une représentation positionnelle

III.2.3.1 La représentation hiéroglyphique

Dans l'ancienne Egypte, le système de numération écrite hiéroglyphique était à base 10 et non positionnel : on disposait de symboles différents pour représenter chacune des puissances de la base (1, 10, 100...). Pour représenter les quantités on répétait les symboles autant de fois qu'il le fallait et la lecture du nombre se faisait par addition de la valeur de l'ensemble des pictogrammes intervenant dans son écriture [IFR 81, DAH 86]. L'ordre de ceux-ci n'importait donc pas. Par exemple, la quantité *trente huit* était représentée par un groupe de *trois symboles des dizaines* et un groupe de *huit symboles des unités*.

Si cela permettait d'apprendre facilement le système de numération (cinq symboles pour représenter des quantités jusqu'au million), on en payait tribut par la lourdeur que prenaient les expressions écrites.

De systèmes de représentation par groupes, les hommes passeront à des systèmes de représentation par pas dont la forme la plus aboutie est celle que nous employons aujourd'hui : *les chiffres* [MEN 70].

III.2.3.2 Le système à chiffres Arabes : un système positionnel

La numération écrite à chiffres est un système positionnel de numération qui permet de représenter n'importe quelle quantité à l'aide d'un nombre de signes réduit à dix (les chiffres de 1 à 9 et le 0) qui ont la particularité de pouvoir décliner chaque puissance de la base par pas (d'unités en unités, de dizaines en dizaines, etc.) à l'aide des mêmes signes. C'est à dire que la signification d'un chiffre, dans le cas d'un nombre qui en comporte plusieurs, dépend de sa position dans le nombre considéré, donc de son contexte : un chiffre donné sera associé aux unités simples, aux dizaines, aux centaines, selon qu'il occupera la première, la seconde ou la troisième place dans l'expression d'un nombre (en partant pour cela de la droite vers la gauche). Ainsi, dans 333333, les chiffres trois sont lus chacun différemment : *trois cent mille*, *trente trois mille*, *trois cents*, etc. Et pour respecter la position et donc la signification de chaque chiffre d'un nombre, l'absence de quantité pour une position donnée est représentée par la quantité nulle (zéro) : 301.

C'est précisément grâce à ce principe de fonctionnement que notre système actuel permet une pratique très facile des opérations arithmétiques. Pour s'en convaincre, il suffit d'essayer de poser par écrit l'opération « 24+49 » en chiffres romains est de résoudre le problème :

$$\begin{array}{r} \text{XXIV} \\ + \text{XLIV} \\ \hline \text{LXXIII} \end{array}$$

III.2.4 Les mots-nombres, pour une expression verbale du nombre

L'utilisation de la forme écrite en lettres permet de représenter n'importe quelle quantité à l'aide d'une suite de mots issus d'un **lexique limité** (mots-nombres) que l'on organise en respectant des **règles syntaxiques** pour que le tout ainsi réalisé **signifie** bien cette quantité et la lecture des mots-nombres s'effectue de gauche à droite, donc dans l'ordre des puissances décroissantes de la base.

Il n'y a aucune ambiguïté lorsqu'on lit un mot-nombre car à une quantité donnée ne correspond qu'un seul nombre et une seule représentation verbale. Cette propriété est mise en valeur lors de la rédaction d'un chèque où sommes d'argent apparaissent en chiffres et en mots afin d'éviter tout malentendu. En français toutefois, les nombres compris entre 1100 et 1999 peuvent se lire « *MILLE CENT* » à « *MILLE NEUF CENT QUATRE VINGT DIX NEUF* » ou « *ONZE CENTS* » à « *DIX NEUF CENT QUATRE VINGT DIX NEUF* ».

III.3 Organisation linguistique du Système français de numération verbale

III.3.1 Préambule

Comme nous venons de le voir, la représentation de quantités à l'aide de mots-nombres est une représentation nommée, donc à caractéristiques linguistiques (lexicales, syntaxiques et sémantiques) qui diffèrent suivant la langue, le pays voire le continent considéré.

Le lexique est à la base du système. De sa régularité dépend la simplicité du système et donc son apprentissage [FUS 91]. Dans le genre, les systèmes orientaux sont des modèles, ce qui n'est pas le cas de notre système en particulier, comme ce n'est pas le cas non plus à des degrés divers pour les systèmes de nos voisins européens.

III.3.2 Le système chinois : un modèle de simplicité et de régularité

Le système chinois comme la plupart des systèmes orientaux est un modèle de régularité. Dans ces systèmes, il existe des mots pour les nombres de 1 à 9 et des mots pour chaque puissance de dix indépendants des premiers cités. Pour nommer les dizaines (ou les centaines, les milliers...), on écrit le mot unité correspondant au nombre de dizaines voulu suivi du mot pour dix. On réalise ainsi une multiplication : un-dix (10)..neuf-dix (90). Pour les nombres compris entre deux dizaines (ou entre deux centaines, milliers...), ce principe multiplicatif est combiné à un **principe additif** [BARO 91]. Par exemple on dit : un-dix-un (11), neuf-dix-neuf (99), deux-mille-trois-cent-quatre-dix-sept (2347).

Les règles d'apprentissage sont donc très simples dans ce type de systèmes, il en va différemment dans les systèmes de mots-nombres occidentaux.

III.3.3 Le lexique des mots-nombres français

III.3.3.1 Généralités

La numération orale française suit des règles de formation très précises. Il s'agit d'une numération de type "hybride" avec deux familles de mots-nombres désignant l'une les neufs chiffres 1,2,3,...,9, et l'autre, différentes puissances de la base de numération, mais pas toutes : dix (10^1), cent (10^2), mille (10^3), million (10^6), milliard (10^9)...

Le mot-nombre zéro n'est utilisé en numération que pour désigner le nombre zéro, il n'entre dans aucune combinaison de mots-nombres désignant des nombres supérieurs ou égaux à un.

La numération orale comporte un certain nombre d'anomalies et d'irrégularités :

- il existe un nom pour :
 - les nombres 11 à 16,
 - les dizaines 20, 30...60. On observe des anomalies pour les dizaines complexes 70, 80 et 90 désignées par une combinaison de mots-nombres de base (fig. III.1). L'anomalie dans les deux cas se fait au niveau du chiffre 7. Hurford [HUR 75] accorde d'ailleurs un statut particulier aux chiffres 7,8,9, 17...19, 70...90,
- le mot "un" est absent devant *cent* dans les nombres de 100 à 199 et devant *mille* dans les nombres de 1000 à 1999,
- le mot "et" est présent entre le nom de la dizaine et "un" dans *vingt et un*, *trente et un*... ou dans *soixante et onze*,
- au delà de mille, il n'existe pas de mots pour les puissances de la base de numération jusqu'au million, de même pour les puissances de la base comprise entre le million et le milliard. Or, *un million* c'est "mille mille", donc les nombres compris entre 1000 et 1.000.000, seront représentés par expressions du type (1...999) *mille* (0...999) et ainsi de suite pour les nombres supérieurs : *un milliard* c'est "mille millions". Ces nombres sont constitués de "paquets" de trois chiffres et donc d'expressions verbales représentant des nombres de 1 à 999 entre lesquelles sont disposées les mots mille, million, milliard. **L'apprentissage des nombres inférieurs à mille est donc primordial.**

III.3.3.2 Organisation du lexique

III.3.3.2.1 En piles lexicales

Les erreurs lexicales faites par des patients aphasiques dans des épreuves de transcodage (passage d'un code à un autre, par exemple du code oral au code numérique en chiffres ou inversement) [DEL 82a, DEL 82b, McCL 87, COH 91] ont permis de montrer que le lexique

était organisé en catégories lexicales. Ces erreurs consistaient à substituer un élément de la classe unité par un autre élément de cette classe, une dizaine par une autre dizaine, etc.. Par contre, le remplacement d'un élément d'une classe par un élément d'une autre classe se produisait très rarement. L'erreur produite était une erreur de position dans une catégorie lexicale ordonnée.

Pour Seron et Deloche d'une part, McCloskey et Caramazza d'autre part, le problème du patient n'était pas de déterminer la catégorie du mot, mais de déterminer la position que ce mot occupait dans la **suite ordonnée** que constituait cette catégorie. Deloche et Seron ont ainsi réalisé une structure du lexique en piles : chaque mot est identifié par son appartenance à une classe et par sa position dans cette classe : *treize* est un nombre particulier, c'est le troisième élément de cette classe dont le premier est *onze* et le sixième *seize* (fig. III.1).

Position	CHIFFRES	CODE ALPHABETIQUE		
		Unités	Particuliers	Dizaines
9 ^{ème}	9	neuf		<i>quatre vingt dix</i>
8 ^{ème}	8	huit		<i>quatre-vingts</i>
7 ^{ème}	7	sept		<i>soixante-dix</i>
6 ^{ème}	6	six	seize	soixante
5 ^{ème}	5	cinq	quinze	cinquante
4 ^{ème}	4	quatre	quatorze	quarante
3 ^{ème}	3	trois	treize	trente
2 ^{ème}	2	deux	douze	vingt
1 ^{ère}	1	un	onze	dix
	0	zéro		
	DIVERS	cent, mille, million, et		

Figure III.1 : Structuration du lexique en piles. D'après [DEL 87a].

La numération à chiffres est positionnelle, nous retrouvons cette propriété dans le tableau ci-dessus : quatre, quatorze, quarante sont les mots qui correspondent au chiffre 4 selon la position qu'occupe ce chiffre dans un nombre.

La taille de ces piles est égale à la dimension de la base moins un (9) sachant que zéro n'est jamais exprimé. Comme la suite des chiffres, ces piles sont ordonnées : 1 (un), 2 (deux)...9 (neuf).

Ces piles ne sont pas complètes : c'est le cas pour les nombres particuliers, mais aussi pour les dizaines où on distingue les dizaines simples (un mot) des dizaines complexes (combinaison de mots) : *soixante-dix*, *quatre-vingts*, *quatre-vingt-dix*.

Enfin, ces piles doivent être complétées par un certain nombre de mots : zéro, cent, mille, million, etc., et le mot *ET* qui apparaît par exemple dans "quarante *et* un".

III.3.3.2.2 D'après le rôle sémantique des mots-nombres

La structuration du lexique adoptée par Power et Longuet-Higgins [POW 78] tient compte quant à elle du rôle sémantique que joue un mot dans une expression. Les combinaisons de mots-nombres sont des associations additives et multiplicatives (cf. III.3.4.1). Dans chacune de ces combinaisons, il y a bien évidemment un terme majeur et un terme mineur (cf. Fig. III.2).

Selon les propres termes de Hurford [HUR 75], à qui revient cette initiative, on appellera :

- m, un majeur de multiplication (multiplicande),
- p, un majeur d'addition,
- n, un terme mineur en toute expression.

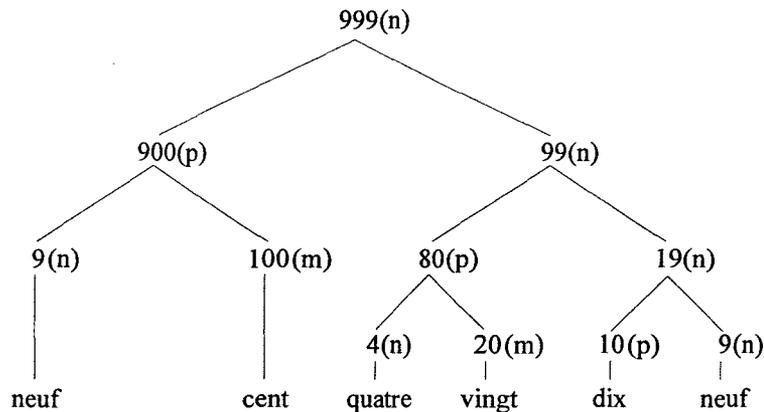


Figure III.2 : Décomposition d'un nombre selon le rôle sémantique de ses constituants.

Un mot n'a pas un rôle unique. Si tout mot peut jouer un rôle mineur (hiérarchie des puissances : unités, dizaines, cent, mille, million...), il peut parfois par contre avoir un rôle majeur dans une association additive voire un rôle majeur dans une expression multiplicative : vingt a un rôle "n" dans *cent vingt*, un rôle "p" dans *vingt quatre* et un rôle "m" dans *quatre-vingts*.

Dans ces conditions, le lexique peut être organisé en fonction du ou des rôles que peuvent prendre ses éléments. Cela nous donne trois ensembles inclusifs : l'ensemble "m" des majeurs de multiplication inclus dans l'ensemble "p" des majeurs de multiplication, lui-même inclus dans l'ensemble "n" (Cf. Fig. III.3).

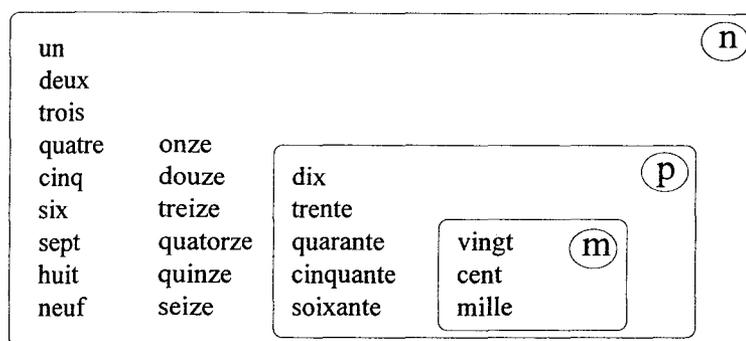


Figure III.3 : Structure du lexique selon le rôle sémantique de chaque élément.

III.3.3.3 Pourquoi le système français est-il irrégulier ?

Les raisons de l'irrégularité du système des mots-nombres sont relativement simples. C'est au XVI^e Siècle que c'est formé de façon quasi-définitive l'architecture de ce système [IFR 81]. Le système de numération a subi les différentes influences des langues parlées dans le pays par les classes supérieures et par le peuple.

Au niveau du système de numération verbale, la lutte eut lieu entre les nombre hérités du latin bien évidemment et :

- les formes faites par addition (soixante dix, quatre-vingt dix) qui remplaceront progressivement septante et nonante,
- un système rival de numération par vingt ou vigésimale d'origine celtique qui était très répandu à l'époque (deux-vingts à dix-neuf-vingts) [BRUN 67]. Ce système imposera quatre-vingts aux dépens de octante ou huitante.

Pour ce qui est de l'origine de l'irrégularité de la première dizaine (les particuliers), il n'existe aucune certitude. Il pourrait toutefois s'agir d'un vestige de numération en base 4 utilisé jusqu'à 16 [MEN 70].

III.3.4 Règles d'organisation des mots-nombres

III.3.4.1 Des structures additives et multiplicatives

En marge des formes simples que constituent les éléments du lexique, la réalisation de tout autre mot-nombre se fait en combinant des mots-nombres de base par addition ou par multiplication [WAG 91]. Ces formes composées symbolisent :

- le total d'une addition : *trente et un, cent quarante trois,*
- le total d'une multiplication : *quatre-vingts, trois cents,*
- le résultat de ces deux opérations : *quatre-vingt onze, neuf cent quatre-vingt huit.*

La réalisation de ces formes composées nécessite de respecter des règles d'organisation. Si pour le jeune enfant, les mots-nombres ne sont qu'une *suite linéaire* [FAY 85] qu'il apprend

par cœur, les représentations mentales faites par l'adulte tiennent compte des caractéristiques linguistiques des mots :

- règles syntaxiques d'associations selon la classe d'appartenance des mots (Deloche et Seron),
- règles d'association selon le rôle sémantique des mots (Power et Longuet-Higgins),
- suivant une grille dans on remplit des cases (McCloskey et Caramazza).

III.3.4.2 Association suivant l'appartenance à une pile lexicale

III.3.4.2.1 Des règles syntaxiques d'acceptation et de rejet

Deloche et Seron ont défini un ensemble de règles syntaxiques d'acceptation et de rejet qui permettent d'analyser la structure grammaticale de suites de mots-nombres [DEL 86]. L'analyse des "phrases" s'opère de gauche à droite par segmentation de la suite à vérifier, par exemple *neuf/cent/quatre/vingt/dix/huit*. Chaque primitive est catégorisée par sa catégorie lexicale et sa position dans cette catégorie (cf. Fig. III.1) : quatre est le 4^e élément de la classe unités ou simplement identifiée si elle n'appartient à aucune des classes lexicales (cent).

Chaque règle traite un, deux, voire trois mots consécutifs et se base sur la catégorie lexicale de ces mots. Par exemple, la règle 6 (cf. Fig. III.4) est une règle générale qui ne considère que l'appartenance aux classes lexicales définies dans son énoncé (U, C). Cette règle déclare correcte l'association de deux mots consécutifs appartenant pour celui de gauche à la classe Unité et pour celui de droite à la classe Centaine : *neuf cent* respecte cette règle. Cependant, la structure de la suite des mots-nombres rejette l'association *un cent*. Le déclenchement de la règle d'acceptation n°6 doit donc être suivi du déclenchement de la règle de rejet n°7 : (U = un, C), règle qui rejette le cas particulier "un cent" afin de vérifier que nous ne sommes pas dans cette situation.

III.3.4.2.2 Algorithme de traitement

L'analyse d'un mot-nombre peut être décrite par un algorithme dont le principe de fonctionnement est le suivant :

- 1) Soit X, le mot à l'extrême gauche du mot-nombre,
- 2) soit Y, le mot à droite de X,
- 2) rechercher la règle correspondant aux classes lexicales de X et Y,
- 3) s'il existe une sous-règle alors appliquer cette sous-règle,
- 4) conclure sur la validité de la structure (X, Y),
- 5) si le mot-nombre n'est pas traité entièrement alors décaler à droite : $X \leftarrow Y$ et aller en 2).

III.3.4.2.3 Les groupes de règles

Ces règles sont regroupées en fonction du nombre de mots à analyser simultanément (cf. Fig. III.4) :

- 1 règle d'**ordre 0** : rejet du mot zéro dans toute expression,
- 21 règles d'acceptation et de rejet d'**ordre 1** : ces règles analysent deux mots consécutifs. Dans l'exemple ci-dessus (neuf cent quatre vingt dix sept), on traite les couples (neuf, cent), (cent quatre), (dix sept),
- 7 règles d'acceptation et de rejet d'**ordre 2** : ces règles analysent trois mots consécutifs. Ces règles concernent notamment l'expression quatre-vingts (Règle 5). Ex : dans quatre vingt dix, on ne peut pas traiter (quatre, vingt) et (vingt, dix) séparément puisque la structure (dizaine, dizaine) n'est acceptée que pour le couple (soixante, dix) : règle 17.

REGLES	ACCEPTER	REJETER	SOUS-REGLES	EXEMPLE
Ordre 0				
R1		ZERO		CENT ZERO TROIS
Ordre 1				
R2		U U		QUATRE DEUX
R3		U P		HUIT TREIZE
R4		U T	5	TROIS VINGT
R5	U=QUATRE T=VINGT		(23) (24)	QUATRE VINGT
R6	U C		7	TROIS CENT
R7		U=UN C		UN CENT
R8		P U		SEIZE DEUX
R9		P T		DOUZE SOIXANTE
R10		P P		QUINZE DOUZE
R11	T U		12 13 (25) (26)	TRENTE CINQ
R12		T U=UN		QUARANTE UN
R13		T=DIX U<7		DIX TROIS
R14		T P	15	DIX QUINZE
R15	T=SOIXANTE P			SOIXANTE DOUZE
R16		T T	17	SOIXANTE TRENTE
R17	T=SOIXANTE T=DIX			SOIXANTE DIX
R18		T C		TRENTE CENT
R19	C U		(27)	CENT TROIS
R20	C T			CENT QUARANTE
R21	C P			CENT SEIZE
R22		C C		CENT CENT
Ordre 2				
R23	U=QUATRE T=VINGT P			QUATRE VINGT ONZE
R24	U=QUATRE T=VINGT T=DIX			QUATRE VINGT DIX
R25		T U T		CINQUANTE QUATRE VINGT
R26		T U C		TRENTE HUIT CENT
R27		C U C		CENT CINQ CENT

U : Unité, T : Dizaine, P : Particulier, C : Cent.

Figure III.4 : Règles syntaxiques d'associations de mots-nombres. D'après [DEL 86].

III.3.4.3 Associations selon le rôle sémantique des mots-nombres

Les règles d'association de mots-nombres utilisées par Power et Longuet Higgins font référence à l'organisation du lexique (ensembles "m", "n", "p") qu'ils ont adoptée (cf. III.3.3.2.2).

Ces associations sont au nombre de deux [HUR 75, POW 78] :

- une association additive $\langle P \rangle \langle N \rangle$,
- une association multiplicative $\langle N \rangle \langle M \rangle$.

Ces associations de base sont à l'origine de règles de production que l'on peut intégrer dans un modèle de grammaire formelle comme le conçoit Chomsky [CHO 59] (cf. Fig. III.2).

Nous pouvons alors élaborer une grammaire G de type 2 comprenant :

- X , un alphabet terminal. $X = \{M, P, N\}$. La figure III.3 nous donne les valeurs que peuvent prendre ces éléments,
- V , un alphabet non terminal. $V = \{p, n\}$,
- S , un élément de départ,
- P , un ensemble de règles de production.

Soit, l'ensemble de règles définies ci-dessous :

$R1 : S \rightarrow n$,

$R2 : n \rightarrow N M$,

$R3 : n \rightarrow p n$,

$R4 : p \rightarrow N M$,

$R5 : n \rightarrow N$,

$R6 : p \rightarrow P$.

Cet ensemble permet d'élaborer des suites de mots-nombres. Par exemple, le déclenchement des règles $R1 (S \rightarrow n)$, $R3 (n \rightarrow pn)$, $R3 (pn \rightarrow ppn)$, $R6 (ppn \rightarrow Ppn)$, $R6 (Ppn \rightarrow PPn)$ et $R5 (PPn \rightarrow PPN)$ permet d'élaborer des mots-nombres comme CENT SOIXANTE DOUZE. Mais la grammaire ne peut pas être réduite à ce que nous venons de voir. Comme l'ont fait Deloche et Seron, des sous règles doivent être créées afin de tenir compte des particularités de la suite des mots-nombres et de la hiérarchie imposée par l'inclusion des classes lexicales. Hiérarchiquement, on peut dire que les éléments de la classe "m" ont un rôle plus important que ceux de la classe "p" qui les englobe et que la classe "p" est plus importante que la classe générale "n" : *soixante* ne peut pas être devant *cent* pour former une association $\langle P \rangle \langle N \rangle$ car *Cent* est hiérarchiquement supérieur puisque faisant partie de la classe "m", *soixante* est donc un terme mineur vis-à-vis de *cent*. Mais, dans les associations de termes de même importance (même classe), une condition prévaut : la valeur représentée par ces mots. Ainsi *cent* (100) est d'importance moindre vis-à-vis de *mille* (1000).

III.3.4.4 Remplissage d'une grille syntaxique interne pré-établie

McCloskey et Caramazza [McCL 87] distinguent production et compréhension de nombres. Dans une épreuve de production orale de mot-nombres à partir d'un nombre écrit en

chiffres, un mécanisme syntaxique de production de nombres déterminerait la plus grande puissance de dix de ce nombre.

Une structure syntaxique générale interne telle que celle présentée ci-dessous serait alors générée (les mots en gras sont invariables et intégrés à cette structure et les cases entre crochets contiendraient les représentations orales des chiffres) :

[Unité] MILLE	[Unité] CENT	[DIZAINE]	[UNITE]
"10 ³ "	"10 ² "	10 ¹	10 ⁰ (puissance représentée par le chiffre)

Le remplissage de cette grille tient compte de la position des chiffres dans le nombre, donc de la catégorie lexicale qu'il faut leur attribuer :

Ex : 7236 → $7*10^3+2*10^2+3*10^1+6*10^0$: **sept MILLE deux CENT trente six.**

Ici encore, les irrégularités de la suite des mots-nombres doivent être prises en compte. Cette grille présente donc des particularités, notamment pour le "un" devant cent ou mille, les nombres particuliers (11 à 16) et le zéro marqué par l'absence de mot à sa position dans le nombre :

Ex : 1013 → [1 (unité)] **MILLE** [0 (unité)] **CENT** [1 (dizaine)] [3 (unité)] soit :

MILLE

treize

III.4 Architectures cognitives des processus de calcul et de traitement des nombres

III.4.1 Le cérébro-lésé source d'observation

Etablir un modèle des mécanismes internes mis en jeu dans des épreuves de calcul et de traitement des nombres à partir de l'observation de sujets normaux ou de soi-même relève de l'introspection. C'est une tâche difficile et périlleuse à effectuer.

L'étude des déficits sélectifs dans le domaine du calcul et du traitement des nombres observés chez des patients cérébro-lésés aide les chercheurs à établir des modèles cognitifs des mécanismes mis en jeu lors de ces activités. La sélectivité des atteintes observées a permis de montrer d'une part que les troubles du calcul sont beaucoup plus diversifiés que la classification établie par Hécaen et ses collaborateurs [HEC 61] ne le laisse présager, d'autre part une telle démarche est intéressante pour établir un modèle cognitif des processus impliqués dans le calcul et le traitement des nombres. En effet, en se basant sur le fait que des troubles spécifiques résultent d'organisations fonctionnelles modulaires, des atteintes spécifiques permettent de déterminer ces modules et les liens qui existent entre eux.

III.4.2 Le modèle de McCloskey et Caramazza et coll.

III.4.2.1 Introduction

Ces auteurs considèrent que trois systèmes cognitifs distincts (cf. Fig. III.5) interviendraient pour traiter les nombres et effectuer des calculs : une fonction compréhension, une fonction production et une fonction calcul [McCL 85], reliée aux fonctions précédentes par l'intermédiaire d'une représentation sémantique du nombre.

III.4.2.2 Le traitement des nombres

Le système de traitement des nombres comprend les systèmes de compréhension et de production de nombres.

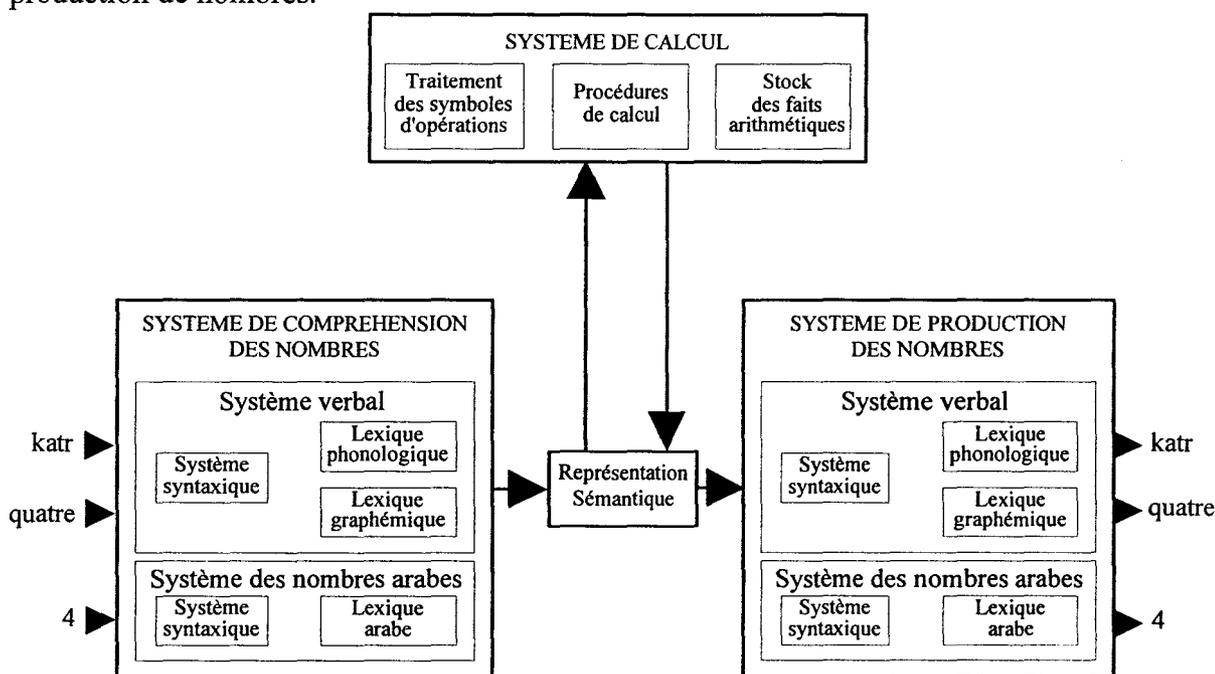


Figure III.5 : Architecture pour le traitement des nombres et le calcul. D'après [McCL 87].

III.4.2.2.1 La compréhension des nombres

Le système de compréhension distingue les différentes formes que peut prendre un nombre (phonétique, graphémique ou en chiffres). Ce système se scinde en deux sous-systèmes : un sous-système de compréhension verbale des nombres pour les formes phonétiques et graphémiques et un sous-système de compréhension écrite des nombres en chiffres.

Chacun de ces sous-systèmes comprend une composante lexicale et une composante syntaxique qui lui sont propres. Les classes lexicales adoptées par McCloskey et Caramazza sont identiques à celles qui ont été établies par Deloche et Seron, seule l'appellation change (Teens à la place de particuliers pour les nombres anglais de 11 à 19) ou la taille des piles si nous n'incluons pas les dizaines complexes au lexique français (cf. III.3.3.2.1).

La sortie de ce module de compréhension serait composée d'une représentation sémantique de la quantité suivant les puissances de la base décimale de numération, comme nous l'avons vu précédemment (cf. III.3.4.4).

III.4.2.2 La production des nombres

Dans le modèle de McCloskey et coll., la production des nombres a une structure analogue à celle du mécanisme de compréhension des nombres (cf. Fig. III.5). Il existe toutefois une différence de taille : les informations d'entrée de ce système de production sont équivalentes aux informations de sortie du système de compréhension (soit des représentations sémantiques) et les informations recueillies à la sortie du système de production sont identiques à celles qui sont appliquées à l'entrée du système de compréhension des nombres (formes écrites ou sonores).

III.4.2.3 Le système de calcul

Le système de calcul décrit par McCloskey et ses collaborateurs comprend trois parties : une unité de traitement des symboles (nombres, symboles arithmétiques à l'écrit ou à l'oral), une unité qui permet de réaliser les opérations de calcul et une unité dans laquelle sont mémorisées des informations comme les tables d'addition et de multiplication.

III.4.2.4 Conclusion

Seron et Deloche, spécialistes francophones des troubles liés au traitement des nombres font remarquer que ce modèle s'inspirant de travaux effectués sur des troubles du langage (alexies) est encore incomplet et "imprécis en différents endroits" [SER 94b] : il n'est pas possible à partir de ce modèle de distinguer les erreurs syntaxiques en production orale et écrite verbale puisque le système syntaxique est commun pour ces deux codes, ou d'avoir un déficit des représentations sémantiques sans problèmes de transcodages puisque la représentation sémantique est un passage obligé entre le module de compréhension et celui de production [SER 93].

Cependant, certaines des dissociations établies par McCloskey et coll. ont été constatées expérimentalement par différents auteurs et parfois avant que ce modèle n'ait été établi [McCL 87, COH 91, SER 93] :

- **dissociation production / compréhension** : observation de Benson et Denckla (cf. III.1.1) et de McCloskey et Caramazza d'un patient qui comprenait

parfaitement des nombres écrits en chiffres ou en mots mais qui présentait de sérieuses difficultés à produire des nombres en chiffres en réponse à des stimuli constitués de mots-nombres. Cohen et Dehaene ont également observé cette distinction,

- **dissociation arabe / verbal** : observation de McCloskey et Caramazza chez un patient qui arrivait à comparer des nombres écrits en chiffres alors que ses performances étaient nettement moins bonnes si ces nombres étaient écrits en mots,
- **distinction lexicale / syntaxe** : des travaux rapportent les cas de patients qui dans des épreuves de transcodage (mots-nombres → nombres arabes) réalisaient des erreurs syntaxiques : 5000600 au lieu de 5600 pour cinq mille six cent, ou lexicales : 65 au lieu de 64 pour soixante quatre,
- **dissociations au niveau du système de calcul** : observation de déficits sélectifs de compréhension des opérateurs arithmétiques.

III.4.3 L'architecture de Deloche et Seron pour le traitement des nombres

III.4.3.1 Introduction

Dans une série d'articles parus entre 1982 et 1986 [DEL 82a, DEL 82b, SER 83c, SER 84, DEL 86], Deloche et Seron ont analysé les erreurs produites par des aphasiques dans des épreuves de transcodage de nombres (ex: chiffres vers mots-nombres) et des épreuves de jugement de grammaticalité de mots-nombres. Ces travaux leur ont permis de recenser les erreurs réalisées par les patients apparaissant ou non selon le d'aphasie qui les caractérisait (aphasiques de Broca avec ou sans aggrammatisme, aphasiques de Wernicke, aphasiques de conduction et autres), ils leur ont aussi permis de mettre au point deux algorithmes de transcodage des nombres [DEL 87b] : l'un pour transcoder un nombre en chiffres vers sa correspondance graphémique, l'autre pour réaliser l'opération inverse.

III.4.3.2 Une architecture asémantique

Comme nous l'avons abordé dans la critique du modèle de McCloskey et Caramazza, Deloche et Seron considèrent pour leur part, qu'il n'est pas nécessaire de passer par une représentation sémantique des nombres dans des activités de transcodage. Le transcodage d'un nombre d'un code vers un autre code se fait selon eux, par "l'application de gauche à droite sur les primitives lexicales du code d'entrée" (par exemple des nombres écrits en chiffres Romains [DEL 85]), "d'un ensemble de règles de transcodage sensibles au contexte et qui fournissent

sur un cadre syntaxique les informations nécessaires à la sélection des éléments du code de sortie (ex : chiffres Arabes [DEL [85)] [SER 93, SER 94b].

A un mot-nombre correspond un nombre en chiffres et un seul car dans notre système de numération positionnel (cf. III.2.3.2), le nom attribué à un chiffre dépend de sa position dans ce nombre : cinq (5), cinquante (50), cinq cents (500). Cette relation biunivoque permet de modéliser formellement ce domaine linguistique à l'aide de règles syntaxiques qui tiennent compte des irrégularités du domaine : chaque expression syntaxiquement correcte est donc intrinsèquement sémantiquement correcte. Un tel ensemble de règles syntaxique a précisément été réalisé par Deloche et Seron (cf. Fig. III.4). En se basant sur ces règles, on peut transcoder des nombres aussi bien du code arabe (1213) vers le code alphabétique (mille deux cent treize) que réciproquement du code alphabétique vers le code arabe sans ce soucier du sens du mot-nombre, **à condition bien sûr que celui-ci soit syntaxiquement correct.**

Partant de ce principe, Deloche et Seron ont mis au point deux modèles de production de nombres. L'un permet d'effectuer le passage des mots-nombres vers les chiffres Arabes, l'autre permet d'effectuer le chemin inverse. Ces modèles reposent sur l'application d'un certain nombre de règles faisant référence aux piles lexicales qu'ils ont définies (pile et position).

III.4.3.3 Algorithmes de transcodage [DEL 87 b]

III.4.3.3.1 Découper les nombres en paquets de trois chiffres

Quelle que soit la taille des nombres à considérer, ceux-ci doivent être découpés en paquets de trois chiffres pour la simple et unique raison qu'un nombre exprimé verbalement est composé d'expressions comprises entre 1 et 999 facteurs de multiplicandes comme milliard, million, millier mises bout à bout, donc de manière additive (cf. III.3.3.1) :

213213 \Leftrightarrow (deux cent treize) mille (deux cent treize).

III.4.3.3.2 Algorithme de transcodage alphabétique / arabe

Remarque préliminaire : le transcodage d'un mot-nombre vers son équivalent en chiffres ne peut pas se faire mot à mot : « cinq cent trois » \rightarrow "51003" est incorrect. Il faut donc observer des règles syntaxiques qui font intervenir de un ([dix] [sept] \rightarrow "17") à trois mots ([quatre vingt dix] [huit] \rightarrow 98).

Lorsque l'on dispose de mots-nombres correspondant à des paquets de trois chiffres (de 1 à 999) on commence par réaliser un cadre syntaxique qui comprend trois positions d_1 , d_2 et d_3 .

Un ensemble de six règles permet alors de faire le transcodage de gauche à droite selon les conditions d'application suivantes (adapté de [DEL 87b]):

- Si un **mot-nombre est à transcoder**, alors appliquer initialement la **règle 1** : remplir chaque position de la structure syntaxique avec 0 \rightarrow "d₁d₂d₃ = 000",
- si le mot correspond à une **dizaine**, alors appliquer la **règle 2** : écrire en d₂ le chiffre correspondant à la position occupée par ce mot dans la classe lexicale des dizaines. Par exemple dans le cas de trente, mettre 3 en d₂, car c'est le chiffre qui correspond à la troisième position de la pile des dizaines,
- si le mot correspond à une **unité**, alors appliquer la **règle 3** : stocker en mémoire de travail le chiffre correspondant à la position occupée par ce mot dans la classe lexicale des unités,
- si le mot est **cent**, alors appliquer la **règle 4** : si la mémoire de travail est vide, alors écrire le chiffre "1" en d₁, sinon écrire en d₁ le chiffre contenu dans la mémoire de travail et effacer la mémoire de travail,
- si la primitive lexicale est un **particulier**, alors appliquer la **règle 5** : écrire en d₃ le chiffre correspondant à la position occupée par ce mot dans la classe lexicale des particuliers et incrémenter de 1", le chiffre présent en d₂. Par exemple, dans le cas de soixante quatorze, on a d₃d₂d₁ qui vaut 060 après avoir traité "soixante", on traite "quatorze" : on met 4 en d₁ (064) et on incrémente d₂ d'une unité (074),
- Si le mot-nombre est entièrement traité, alors appliquer la **règle 6** : écrire le contenu de la mémoire de travail en d₃ si celle-ci n'est pas vide et supprimer tous les "0" qui ne sont pas précédés à leur gauche d'un chiffre compris entre 1 et 9 : (d₁d₂d₃=007 \rightarrow 7).

Ex : six cent soixante treize	d ₁	d ₂	d ₃	mémoire de travail
initialisation \Rightarrow Règle 1	0	0	0	0
"six" est une unité \Rightarrow Règle 3	0	0	0	6
"cent" \Rightarrow Règle 4	6	0	0	0
"soixante" \Rightarrow Règle 2	6	6	0	0
"treize" \Rightarrow Règle 5	6	7	3	0

La généralisation de cet algorithme aux nombres supérieurs à MILLE implique d'utiliser une règle supplémentaire. On traite les premiers mots de la chaîne et lorsque l'on rencontre le mot *mille*, on applique la **règle 7** : appliquer la règle 6, générer un nouveau cadre syntaxique (d₁d₂d₃) à la droite des trois digits que l'on vient d'inscrire et appliquer les règles 1 à 6* aux mots situés à droite du mot mille contenu dans la chaîne à transcoder.

La règle 6 est alors modifiée en 6* pour ne pas supprimer les "0" à gauche qui ici sont significatif (ex : 362007).

Remarque importante : le modèle de Deloche et Seron tel que défini ainsi ne permet pas de transcoder la dizaine complexe "quatre vingts". Si on applique l'algorithme, on obtient 24 :

Ex : quatre vingts	d_1	d_2	d_3	mémoire de travail
initialisation \Rightarrow Règle 1	0	0	0	0
"quatre"est une unité \Rightarrow Règle 3	0	0	0	4
"vingt" \Rightarrow Règle 2	0	2	0	4
Règle 6		2	4	0

Cette remarque s'applique aussi pour les dizaines complexes "soixante dix" et "quatre vingt dix". Pour y remédier nous proposons de modifier la **règle 2** et de la remplacer par :

- si le mot est vingt et si le contenu de la mémoire de travail est 4, alors écrire 8 en d_2 et effacer la mémoire de travail, sinon écrire "2" en d_2 ,
- si le mot est dix et si d_2 vaut 6 ou 8, alors incrémenter d_2 d'une unité (respectivement pour soixante dix et quatre vingt dix), sinon écrire "1" en d_2 ,
- si le mot est une dizaine et qu'aucune des conditions ci-dessus n'est vérifiée alors écrire en d_2 le chiffre correspondant à la position occupée par ce mot dans la classe lexicale des dizaines.

III.4.3.3 Algorithme de transcodage arabe / alphabétique

Lorsque l'opération qui consiste à réaliser des paquets de trois chiffres est réalisée, le transcodage peut commencer. Il a lieu chiffre par chiffre en partant de la gauche vers la droite.

Le système de numération à chiffres est positionnel, il faut donc tenir compte à la fois de la valeur du chiffre à traiter et de sa position dans le nombre. Cela se traduit pour le mot-nombre correspondant à ce chiffre en une classe lexicale et une position dans cette classe lexicale. Par exemple, dans 213 :

- "2" est en position centaine, le mot-nombre qui lui correspond est « deux cents »,
- "1" est en position dizaine, dans ce cas le mot-nombre qui lui correspond dépend du chiffre qui le suit car cela peut être dix ou un particulier. Ce chiffre est "3", il faut donc considérer les deux chiffres simultanément pour réaliser le particulier « treize ».

Le mot-nombre complet est la concaténation de tous ces mots-nombres soit « deux cent treize ».

Un ensemble de quatre règles permet de faire le transcodage de gauche à droite selon les conditions d'application suivantes (adapté de [DEL 87b]):

Règle A : créer initialement un cadre syntaxique à trois positions $d_1d_2d_3$,

Règle B : placer les trois chiffres dans ce cadre syntaxique de la droite vers la gauche. Si des positions sont inoccupées, les remplir avec "0",

Règle C : si le chiffre à la position d_i vaut "0" alors appliquer la règle D si et seulement si $i = 3$, sinon passer à l'élément d_{i+1} . Si le chiffre à la position d_i est différent de 0 alors appliquer l'une des règles ci-dessous :

Règle 1 : transcoder d_1 en la primitive de la classe lexicale des unités située à la même position que le chiffre contenu en d_1 sauf si d_1 vaut 1 puis écrire "cent" à la suite(ex : $d_1=1 \rightarrow$ cent),

Règle 2 : transcoder d_2 en la primitive de la classe lexicale des dizaines située à la même position que le chiffre contenu en d_2 (ex : $d_2=9 \rightarrow$ quatre vingt dix),

Règle 3 : transcoder d_3 en la primitive des unités située à la même position que le chiffre contenu en d_3 sauf si le dernier mot du mot-nombre que l'on vient de produire est "dix" et que le chiffre contenu en d_3 est inférieur à 7. Si c'est le cas (nombre particulier), effacer "dix" et écrire à la suite la primitive des particuliers située à la même position que le chiffre contenu en d_3 ,

Règle D : lorsque tous les chiffres ont été traité, le transcodage prend fin.

Ex : 295	cadre syntaxique			mot-nombre réalisé
initialisation \Rightarrow Règle A	d_1	d_2	d_3	
295 \Rightarrow Règle B	2	9	5	
$d_1 \Rightarrow$ Règle C, puis Règle 1				deux cent
$d_2 \Rightarrow$ Règle C, puis Règle 2				deux cent quatre vingt dix
$d_3 \Rightarrow$ Règle C, puis Règle 3				deux cent quatre vingt quinze
Règle D : fin				deux cent quatre vingt quinze

Pour des nombres plus grands que MILLE, on réitérera l'opération sur les différents groupes de trois chiffres en insérant dans la chaîne de caractères le multiplicande adéquat (mille, million, milliard).

Remarque : cet algorithme ne tient pas compte du mot "et" qui peut éventuellement se glisser entre une dizaine et les mots "un" et "onze".

III.4.3.4 Conclusion

Selon ses propres concepteurs [SER 94b], cette architecture ne tient pas compte du fait que pour employer des nombres il faut les comprendre donc en avoir une représentation sémantique. Et si ce n'était pas le cas, un patient qui présenterait des troubles de compréhension des nombres tout en étant capable de les transcoder (ou les produire) serait la preuve manifeste de la validité de leur modèle. Or un tel cas n'a jamais été rencontré jusqu'à présent [SER 93].

Ce modèle présente pourtant des similitudes avec le modèle de McCloskey et Caramazza : classes lexicales similaires, rôle accordé aux particuliers et séparation des grands

nombres en paquets de trois chiffres de part et d'autre des multiplicateurs que sont Mille, Million, etc. (33.333.333). Mais, le modèle de transcodage asémantique de Deloche et Seron ne sépare pas suffisamment les opérations de compréhension et de production de nombres [SER 94b].

III.4.4 Le modèle de Campbell et Clark

Campbell et Clark considèrent que les processus de traitement des nombres et du calcul ne peuvent pas être modélisés par un nombre relativement peu élevé, et donc très simplifié, de modules fonctionnels distincts relatifs à des activités bien spécifiques (compréhension, production, calcul) comme l'ont considéré d'une part Caramazza et ses collaborateurs et d'autre part Seron et Deloche. Campbell et Clark rejettent également l'idée de codes abstraits de représentation des nombres (représentation sémantique suivant les puissances de la base comme le suggère McCloskey : 8043 représenté $\{8\} * 10^3 + \{0\} * 10^2 + \{4\} * 10^1 + \{3\} * 10^0$).

Le modèle "d'encodage complexe" proposé par Campbell et Clark [CAM 88, CLAR 91] comprend un réseau complexe de représentations des nombres non modulaires dans lequel plusieurs codes numériques (phonologique, graphémique, chiffres) peuvent s'activer mutuellement lors d'activités de calcul ou de traitement des nombres. La représentation interne des nombres est alors une forme complexe associant plusieurs codes : c'est l'encodage complexe. Selon les activités réalisées (compréhension, production, calcul), ces codes en réseau apportent leur contribution de façon plus ou moins importante par l'intermédiaire de processus de traitement des nombres communs et non indépendants.

Les auteurs ne précisent toutefois pas les codes qui seraient utilisés dans les tâches de traitement des nombre et de calcul, ni comment ces codes seraient utilisés, comme le souligne McCloskey [McCL 92].

III.4.5 Le modèle de Dehaene et Cohen

III.4.5.1 Deux types de représentations : exacte et approximative

Les résultats observés par Dehaene et Cohen [DEH 91] à partir d'activités de calcul arithmétique et de comparaison de nombres chez le cas unique N.A.U. leur ont permis d'avancer un modèle qui comprend lui aussi des modules bien spécifiques (compréhension, production de nombres) lesquels sont reliés par deux types de représentations mentales dissociées qui dépendent des activités réalisées (cf. Fig. III.6) :

- *une représentation analogique* : le patient N.A.U. n'arrivait pas à donner le résultat exact d'opérations arithmétiques comme "2+2". Il était incapable de dire que "2+2 = 5" était faux mais par contre reconnaissait que "2+2 = 9" l'était : si l'écart avec la solution était important, ce patient savait donner un jugement

correct. Ce patient n'avait plus une vision précise des nombres mais savait encore estimer et disposer sur une échelle des nombres compris entre 1 et 100 en respectant sensiblement les distances. En se basant sur des études faites avec des sujets normaux qui mettaient plus de temps à comparer des nombres proches (49 <?> 55) que des nombres plus éloignés (41 <?> 55), Dehaene et Cohen ont considéré que dans des épreuves de comparaison ou d'estimation, plus l'écart entre la bonne solution et une solution fautive proposée est important, plus il y a de chances que la personne détecte cette erreur. Nous aurions donc une représentation mentale des nombres sous une forme analogique, accessible par l'intermédiaire d'une conversion numérique/analogique. Représentation qui ne serait pas linéaire mais logarithmique : les distances entre les nombres ayant tendance à diminuer lorsque ces nombres représentent des quantités de plus en plus importantes. Cette **représentation analogique** des distances serait **approximative** : il n'est pas nécessaire de connaître la distance exacte entre deux nombres pour dire lequel est le plus grand,

- *une représentation symbolique* : dans des épreuves de transcodage, de jugement de parité ou pour la réalisation de calculs arithmétiques, une autre route pour laquelle il serait nécessaire d'avoir une **représentation exacte des nombres** ou des symboles (chiffres, mots,...) serait empruntée. C'est précisément cette route qui serait lésée chez le patient N.A.U. qui n'arrive pas à donner le résultat exact d'une addition, d'une soustraction ou d'une multiplication, mais qui sait encore fournir la réponse la plus plausible lorsqu'on lui présente plusieurs solutions et qu'il doit faire un jugement, une estimation.

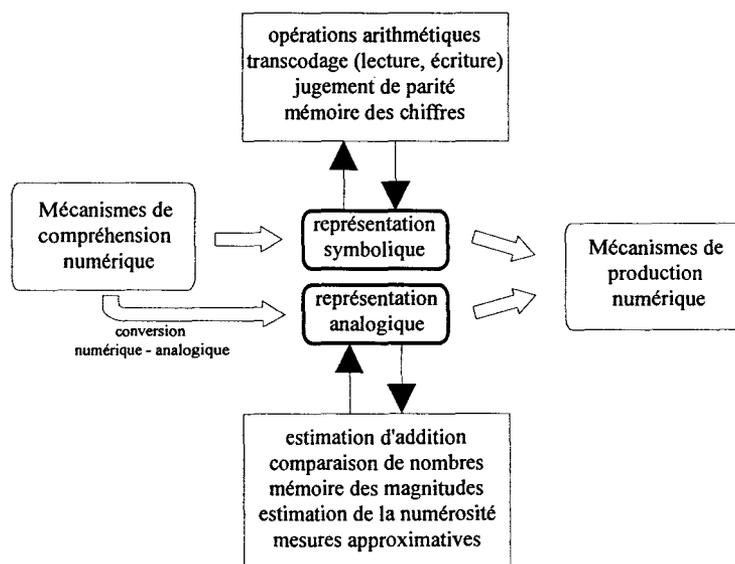


Figure III.6 : Les deux systèmes de représentation mentale des nombres. D'après [DEH 91]

III.4.5.2 Le modèle triple code

Par la suite, Dehaene [DEH 92] a proposé un modèle plus complet et plus détaillé qui place trois codes interconnectés (code visuel en chiffres arabes, code verbal auditif, et représentation analogique sur un "axe des nombres") au centre du processus du traitement des nombres, à la manière de l'encodage complexe de Campbell et Clark (cf. Fig. III.7).

En fait, ce modèle s'intercale entre celui de McCloskey et coll. et celui de Campbell et Clark, car on y note la présence comme chez McCloskey et Caramazza de modules constitués d'activités particulières (opérations arithmétiques, comptage, comparaison) reliés à des codes bien spécifiques.

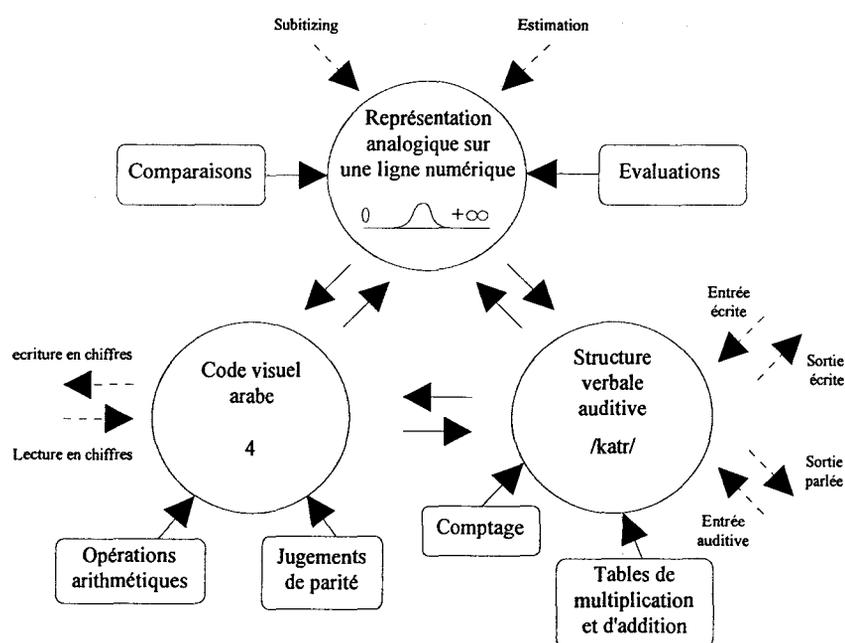


Figure III.7 : Modèle triple code : arabe, verbal et analogique. D'après [DEH 92].

III.4.6 Conclusion

Parmi les modèles que nous venons de présenter, ceux de McCloskey/Caramazza et Deloche/Seron se basent sur de nombreuses observations d'erreurs et de comportements de cérébro-lésés qui permettent d'expliquer les orientations suivies par ces chercheurs : ces deux modèles dépassent le cadre de la théorie et beaucoup des hypothèses avancées ont été vérifiées expérimentalement.

Les deux autres modèles présentés sont plus récents. Celui de Campbell et Clark est en totale contradiction avec les modèles plus anciens que sont ceux de McCloskey/Caramazza et Deloche/Seron, alors que le modèle de Dehaene s'intercale entre le point de vue connexionniste de Campbell et Clark et le point de vue modulariste de leurs prédécesseurs.

Ces dernières années, beaucoup d'études ont été réalisées avec des cas uniques. Il est évident que cela ne permet de faire des généralisations que si les observations convergent [McCL 92]. Mais, si l'observation de certaines caractéristiques a permis d'imaginer des représentations cognitives du traitement des nombres et du calcul, rien ne permet de dire qu'un jour, ne seront pas rencontrées des caractéristiques qui infirmeraient un point de vue ou qui permettraient de valider un modèle ou une orientation cognitive qui ne l'a pas été jusqu'alors.

Il est d'ailleurs certain qu'il reste beaucoup de travail à effectuer, et que si aucun de ces quatre modèles ne fait l'unanimité, aucun ne peut être rejeté. La recherche en neuropsychologie du calcul vise à dresser des modèles théoriques du traitement des nombres et du calcul qui rendent bien compte des processus cognitifs mis en oeuvre dans ces tâches et de leur fonctionnement. Cette compréhension est nécessaire pour fournir une rééducation adaptée aux cérébro-lésés acalculiques, mais aussi aux enfants en difficulté [FER 90].

III.5 L'apprentissage de la série des mots-nombres

III.5.1 Quand effectuer cet apprentissage ?

la connaissance des mots-nombres précède généralement celle des chiffres, le langage verbal étant acquis avant le langage écrit [BRIS 89]. Il revient à J. Piaget d'avoir montré que le concept du nombre a une histoire et que l'accès à ce concept suppose des constructions préalables relatives notamment aux conservations et à l'ordination, établies lors de la période préopératoire [BID 80]. L'étude des nombres ne relève pas donc pas de l'école maternelle. L'apprentissage de la série des noms des nombres se déroule durant les cinq années du cycle primaire (C.P., C.E.1, C.E.2, C.M.1, C.M.2) qui correspondent à des périodes charnières du développement de l'enfant : fin de la période préopératoire et début de la période opératoire concrète (cf. A.4.2.4.2).

III.5.2 Découpage des apprentissages

Le découpage de l'apprentissage se fait en plusieurs étapes qui respectent la progression de cette série ordonnée et qui tiennent compte des particularités du lexique et des structures syntaxiques qui apparaissent [EIL 77, EIL 81, AUD 85, PEL 92] :

- de 0 à 60 : de 0 à 6, de 0 à 16, puis de 0 à 30 et enfin de 0 à 60,
- de 60 à 99 : de 60 à 70, de 60 à 80 puis de 60 à 99,
- de 100 à 1000 : de 100 à 199 puis de 100 à 1000,
- au delà de 1000 : découpage des nombres en paquets de trois (cf. III.3.1).

III.5.3 Conséquences liées au concept et à l'irrégularité des mots-nombres

Cet apprentissage ne se fait pas sans difficultés. Il s'agit de réaliser un apprentissage visant à provoquer un mode d'acquisition de la connaissance mathématique où la notion n'est jamais directement enseignée par le maître, mais progressivement élaborée par l'enfant lui-même. L'enfant effectue des remaniements ou des ruptures dans les stratégies qu'il utilise spontanément et les modifie selon un processus adaptatif (cf. A.4.2.4.3.2). Cet apprentissage met en oeuvre à la fois des modifications de conduites qui relèvent d'un certain type de conditionnement renforcé (cf. A.4.1.6) mais aussi des remaniements internes d'ordre structurel.

Les mécanismes sous-jacents à cet apprentissage sont pour les premiers nombres une succession de mots-nombres de base, puis pour les nombres plus grands une composition de mots-nombres suivant des règles syntaxiques très strictes, mais qui constituent toujours une suite linéaire.

C'est, on s'en doute, l'irrégularité de notre système de numération orale qui en est la cause des difficultés rencontrées par les enfants [SER 91, FUS 91], difficultés principalement d'ordre logique : d'une part la suite des mots-nombres est une **suite ordonnée**, d'autre part elle présente des **anomalies**. Anomalies que l'on rencontre dans la suite elle-même mais aussi lorsqu'il s'agit d'effectuer des transcodages (chiffres <--> mots : 400025 pour Quatre mille vingt cinq) [SER 91]. On observe alors des erreurs structurales : lexicales et syntaxiques. Ces erreurs ne se produisent d'ailleurs pas que chez l'enfant en difficulté, on les rencontre aussi chez le cérébro-lésé [DEL 82a, DEL 82b, SER 83, SER 84, DEL 86, DEL 87a, DEL 87b, McCL 87, COH 91, DEH 92, etc.].

Mais ce n'est pas l'unique cause, les petits nombres ont une signification pour l'enfant : un frère, quatre biscuits, ce qui n'est pas le cas des nombres plus grands. Le sens des mots-nombres est, initialement celui d'une place dans la suite (huit est le mot après sept et avant neuf). On peut à la rigueur leur faire comprendre ce que représente le nombre 25 s'il permet de montrer que la classe est une collection de 25 élèves. C'est le concept même de nombre que l'enfant doit acquérir.

Il est donc nécessaire de mettre en oeuvre des directives pratiques qui facilitent ou qui permettent à l'enfant en difficulté de remédier à ses difficultés de comptage. Baroody [BARO 91] présente de telles pratiques pour des difficultés rencontrées dans l'ordonnement de la suite des mots-nombres, le dénombrement, la production de mots-nombres et les relations entre nombre et collection d'objets.

III.6 Rééducations expérimentales du traitement des nombres chez le cérébro-lésé

III.6.1 Introduction

Sur la base des algorithmes de transcodage établis par Deloche et Seron, deux méthodes structurées de rééducation de l'écriture des nombres ont été développées. Ces méthodes, nous le verrons par la suite, ont été expérimentées par des orthophonistes auprès de patients aphasiques et d'enfants en difficulté.

III.6.2 Méthode de rééducation du transcodage des mots-nombres en chiffres [DEL 87a]

Cette méthode se base sur l'algorithme de **transcodage des mots-nombres (sept cent trois) en chiffres (703)** établi par Deloche et Seron (cf. III.4.3.3.2).

La rééducation comporte trois niveaux spécifiques et un niveau récapitulatif découpés en étapes :

- Niveau 1 : dizaine - unité (nombres à deux chiffres) :
 - étape 1 : repérage des noms des dizaines complexes dans des suites de mots-nombres,
 - étape 2 : transcodage des dizaines sans particuliers,
 - étape 3 : transcription des particuliers hors dizaine (11..16),
 - étape 4 : transcodage des particuliers intégrés dans les dizaines,
 - étape 5 : récapitulatif,
- Niveau 2 : CENT (nombres à trois chiffres) :
 - étape 1 : repérage du groupe de mots des centaines (un ou deux mots),
 - étape 2 : production de nombres à trois chiffres,
- Niveau 3 : MILLE (nombres à quatre ou six chiffres) :
 - étape 1 : repérage de MILLE,
 - étape 2 : MILLE dans le rôle de multiplicande,
 - étape 3 : MILLE multiplicande ou non,
- Niveau 4 : cas général : récapitulatif des trois niveaux précédents.

III.6.3 Méthode de rééducation du transcodage des chiffres en mots-nombres

Cette méthode se base quant à elle sur l'algorithme de **transcodage des chiffres (703) en mots-nombres (sept cent trois)**, établi lui aussi par Deloche et Seron (cf. III.4.3.3.3).

La rééducation comporte cinq niveaux spécifiques et un niveau général découpés en étapes pour lesquelles des facilitations sont proposées aux patients et successivement estompées :

- Niveau 1 : cas de la plupart des nombres à deux chiffres (ce niveau n'inclut ni les nombres ou un "et" apparaît, ni ceux comportant un zéro) :
 - étape 1 : structures sans particuliers,
 - étape 2 : structures dizaine / particulier,
 - étape 3 : récapitulatif et particuliers seuls,
- Niveau 2 : cas de la plupart des nombres à trois chiffres (ce niveau n'inclut ni les nombres ou un "et" apparaît, ni ceux comportant un zéro) :
 - étape 1 : CENT dans le rôle de multiplicande,
 - étape 2 : CENT multiplicande ou non,
- Niveau 3 : cas du "0" en position dizaine ou unité,
- Niveau 4 : cas de la plupart des nombres de 4 à 6 chiffres :
 - étape 1 : positionnement du point décimal entre les paquets de chiffres,
 - étape 2 : MILLE dans le rôle de multiplicande,
 - étape 3 : MILLE multiplicande ou non,
- Niveau 5 : cas de "et",
- Niveau 6 : cas général : récapitulatif des cinq niveaux précédents. L'exercice se passe sans cadre syntaxique, ni facilitations.

III.6.4 Déroulement des séances de rééducation et progression du patient

La rééducation a lieu à raison de trois séances par semaine. Chaque séance se déroule suivant les mêmes conditions du début à la fin. On appelle condition un moyen d'aide, de facilitation proposé aux patient (cadres réponse, couleurs, etc.).

Les facilitations sont successivement estompées, il y a ainsi plusieurs conditions, chacune représentant un niveau d'aide inférieur à la précédente.

Une même étape sera donc exécutée autant de fois qu'il existe de conditions, et la dernière fois elle se déroulera sans aucune aide. Le but de cette démarche est de permettre au patient d'arriver progressivement à être autonome, c'est à dire en conditions normales.

Le passage d'un niveau ou d'une étape au suivant se fait lorsqu'un critère de réussite est atteint (90% de réussite). Par contre si le taux de réussite est insuffisant à la fin d'une étape ou si le patient a manifesté des conduites anormales, on conduit le patient à revenir à une étape antérieure plus simple et qu'il est capable de réaliser.

III.6.5 Expérimentation chez l'aphasique acalculique

III.6.5.1 Programmes de Ternon et Martigny [TER 87]

III.6.5.1.1 Présentation

Les programmes de rééducation mis au point par Deloche, Seron et Ferrand ($1 \rightarrow \text{un}$ et $\text{un} \rightarrow 1$) ont été expérimentés par Ternon et Martigny chez des patients aphasiques.

Ces deux thérapies étaient précédées d'un pré-test et suivies d'un post-test, lesquels consistaient à effectuer des transcodages selon plusieurs codes (alphabétique, numérique, collection de jetons) :

- ($1 \rightarrow \text{un}$) : chiffres vers mots-nombres,
- ($\text{un} \rightarrow 1$) : mots-nombres vers chiffres,
- ($\text{un} \rightarrow Q$) : mots-nombres vers collections de jetons (jetons unités, dizaines, centaines...),
- ($1 \rightarrow Q$) : chiffres vers collections de jetons,
- ($Q \rightarrow \text{un}$) : collections de jetons vers mots-nombres,
- ($Q \rightarrow 1$) : collections de jetons vers chiffres.

Ces méthodes ont été testées chez huit patients, et pour chacun, d'eux seulement une thérapie était proposée ($1 \rightarrow \text{un}$ ou $\text{un} \rightarrow 1$). Le choix de l'une ou de l'autre des thérapies était fait en fonction des résultats au pré-test (rééducation du plus mauvais score). Les résultats au post-test devaient permettre de vérifier si un transfert d'apprentissage s'effectuait dans l'autre sens.

III.6.5.1.2 Résultats

Pour plusieurs patients il a été nécessaire soit de revenir en arrière quand les difficultés rencontrées étaient trop importantes, soit de court-circuiter des étapes jugées trop faciles : **il est donc possible malgré la structure rigide du programme, d'adapter celui-ci au patient.**

Les résultats au post-test ont montré qu'il y avait eu une **amélioration des performances** pour la majorité des patients, **même pour les types de transcodage non rééduqués.**

Le tableau III.8 présente les résultats au pré-test et au post-test de Monsieur R. Au pré-test les performances pour le transcodage $\text{UN} \rightarrow 1$ étaient plus mauvaises que pour le transcodage $1 \rightarrow \text{UN}$. La thérapie proposée fut donc de rééduquer le transcodage mots-nombres \rightarrow chiffres.

Au post-test l'amélioration fut spectaculaire, on passait de 39% d'erreurs à 1% pour la tâche rééduquée. Dans l'autre sens (1 → UN), l'amélioration fut tout aussi spectaculaire : de 29% à 3% d'erreurs, **un transfert d'apprentissage avait bien eu lieu**. Et pour la majorité des autres tâches, on observait une amélioration notable des performances, seul le transcodage jetons → chiffres n'a pas bénéficié du transfert d'apprentissage, mais il est vrai que le taux d'erreurs y était déjà faible.

	Pré-test	Post-test	amélioration
I → UN	29%	3%	+ 26%
UN → 1	39%	1%	+ 38%
UN → Q	6%	1%	+ 5%
I → Q	6%	0%	+ 6%
Q → UN	45%	30%	+ 15%
Q → 1	3%	3%	—

Figure III.8 : Comparaison des performances de Mr R. au pré-test et au post-test, en pourcentage d'erreurs. D'après [TER 87].

III.6.5.2 Programmes de Ferrand [FER 90]

III.6.5.2.1 Présentation

Les programmes de rééducation employés par Ferrand chez un patient présentant des troubles de la syntaxe des mots-nombres ont consisté en :

- **thérapie 1** : jugement de grammaticalité. Un grand nombre (616) de mots-nombres a été présenté au patient (50% corrects, 50% syntaxiquement incorrects). La consigne donnée au patient était d'indiquer si les mots-nombres proposés étaient "bien écrits" ou non. L'élément de thérapie fourni consistait uniquement à donner à ce malade la nature exacte de sa réponse : "juste" ou "fausse",
- **thérapie 2** : présentation explicite des règles syntaxiques élaborées par Deloche et Seron (cf. III.3.4.2.3, cf. Fig. III.4) selon cinq niveaux de hiérarchie, puis déroulement d'exercices de reconnaissance de ces règles et de production de mots-nombres de deux à quatre mots.

III.6.5.2.2 Résultats

A l'issue de chacune de ces thérapies, des progrès sensibles ont été observés chez le malade. Progrès qui ont été confirmés lors d'épreuves de transcodage, donc lors d'épreuves pour lesquelles aucune rééducation spécifique n'avait été entreprise. **Il y a donc eu un transfert des apprentissages lors de cette thérapie.**

III.6.6 Expérimentation chez l'adolescent en difficulté [FER 90]

III.6.6.1 Présentation

Le programme de rééducation entrepris par Ferrand a été proposé à deux adolescents en difficulté âgés de 12 et 15 ans. Pour ces enfants, l'écriture et la lecture des mots-nombres était impossible. Ce déficit de compréhension et de production de mots-nombres avec préservation du code oral a conduit cette orthophoniste à mettre en oeuvre un programme de rééducation de transcodage de chiffres en mots-nombres (1 → un) avec production orale des mots-nombres réalisés.

III.6.6.2 Résultats

L'utilisation de ce programme de rééducation a porté ses fruits aussi bien en compréhension (lecture à haute voix, transcodage un → 1) qu'en production (écriture sous dictée, transcodage 1 → un). Au terme de ce programme, ces enfants étaient en mesure de transcoder des nombres de deux à six chiffres en mots-nombres et inversement, d'écrire des mots-nombres directement sous dictée, de lire ces mots-nombres et de faire un jugement de grammaticalité de mots-nombres syntaxiquement corrects ou non.

III.7 Conclusion

Les activités de traitement des nombres peuvent être décrites par des composants lexicaux, syntaxiques et sémantiques simples et formels. Cela permet de faciliter la découverte des mécanismes internes sous-jacents mis en jeu dans ces activités et d'établir des modèles de fonctionnement simples et pourquoi pas d'aider à modéliser des activités cognitives plus complexes [SER 94b].

Les travaux et recherches réalisés dans le domaine du calcul avec une orientation cognitive sont récents, mais cela permet déjà d'apporter une thérapie efficace aux patients acalculiques. Les différents programmes de rééducation expérimentés par Martigny, Ternon et Ferrand ont conduit à une amélioration sensible des performances de leurs patients.

Comme nous l'avons vu au chapitre I, la rééducation des aphasiques est bénéfique dans des activités langagières journalières (compréhension et production orale et/ou écrite). On constate ici que la récupération peut avoir lieu dans des activités plus spécifiques (calcul et traitement des nombres) à l'aide de programmes de rééducation structurés sans pour autant être rigides, donc adaptables aux troubles du patient.

L'expérimentation de ces programmes chez des adolescents en difficulté, pour lesquels le trouble n'est pas acquis mais développementale, s'est également soldée positivement. Mieux comprendre comment le cerveau fonctionne, c'est aussi permettre d'élaborer des pédagogies nouvelles, mieux adaptées et plus efficaces.

Les programmes de rééducation que nous avons décrits à la fin de ce chapitre ont porté leurs fruits. La structure algorithmique de ces programmes permettrait de les implanter facilement sur micro-ordinateur.

Pour notre part, dans L.A.R.A. (Logiciel d'Aide à la rééducation des Aphasiques), nous avons simplement évoqué le nombre sous sa forme verbale écrite: le mot-nombre, mais il est bien évident que des épreuves de transcodage pourraient facilement y être adjointes, sur la base des programmes thérapeutiques décrits dans ce chapitre.

Les épreuves de traitement des nombres présentes dans L.A.R.A. consistent à décider de la conformité syntaxique ou non de suites de mots-nombres ou à produire des mots-nombres en combinant un ensemble de mots-nombres issus de ce lexique.

Nous allons découvrir ceci à la fin du chapitre suivant, dédiée à la présentation des épreuves qui constituent actuellement le système L.A.R.A. (cf. IV.6.3).

Chapitre IV

LE SYSTEME L.A.R.A.

IV.1 Introduction

Les systèmes informatiques dont les caractéristiques répondent le mieux à l'individualisation et à l'adaptation de l'apprentissage aux apprenants sont les systèmes d'E.I.A.O. décrits dans l'annexe C. La rééducation des aphasiques assistée par ordinateur a des exigences proches de celles que requiert l'E.I.A.O.. Le but est identique : déterminer dans un premier temps les connaissances et les difficultés de l'élève, puis dans un deuxième temps lui apporter des connaissances afin de le faire évoluer vers un profil final. Cependant, dans un système d'E.I.A.O., le transfert des connaissances est primordial, et cela au détriment de l'analyse des connaissances de l'élève. En Rééducation, l'évaluation des troubles et des capacités résiduelles du malade est essentielle. Le but est de restaurer les fonctions déficitaires du malade ou de permettre l'établissement de stratégies compensatrices afin d'optimiser l'autonomie du patient.

Un système d'E.I.A.O comprend généralement quatre parties qui sont l'expertise du domaine, la modélisation de l'apprenant, un pédagogue et une interface de dialogue avec l'utilisateur :

- L'expertise du domaine varie beaucoup en fonction des domaines et des types de problèmes à enseigner : résolution d'exercices, élaboration d'un diagnostic, etc. Elle représente les connaissances factuelles ou les heuristiques à transmettre à l'apprenant. Elle peut aussi représenter les démarches attendues des élèves (justes mais aussi fausses). La différence essentielle avec la rééducation des aphasiques se situe ici. Dans ce dernier cas, les connaissances expertes sur le domaine ne se composent pas des raisonnements linguistiques corrects que l'on voudrait enseigner au malade. Elles représentent des perturbations des "raisonnements" des malades. La grande diversité des troubles que l'on rencontre chez les malades rend cette expertise difficile et il est difficile d'établir un profil pathologique type ou "idéal". La compréhension de la logique sous-jacente aux productions des malades est à ce sujet un thème de recherche important en neuropsychologie [GUY 87. DEL 87b]. Il va sans dire que si la pathologie aide le neuropsychologue à affiner ses modèles du fonctionnement cognitif normal, disposer de ces modèles permet

de mieux interpréter les déficits observés chez les malades et par conséquent de mieux les soigner,

- La modélisation de l'élève est essentielle en rééducation des aphasiques. Selon Guyard [GUY 87], le modèle de l'apprenant doit représenter les connaissances et les difficultés linguistiques du malade. Il s'agit de modéliser les raisonnements pathologiques du malade, et non pas de se contenter d'un récapitulatif, statistique par exemple, des réponses justes et incorrectes. Ces connaissances erronées, différentes de celles de l'expert font généralement appel à un modèle différentiel de l'élève. Elles sont intégrées au système uniquement par l'intermédiaire des réponses fournies par le malade puisqu'il n'est pas possible de demander explicitement au malade d'aider le système à en prendre connaissance. C'est cette voie qui a été suivie dans le système S.A.R.A.H. (Système d'Aide à la Rééducation des ApHasiques) [MAS 90] directement inspiré des travaux de Guyard,
- Le pédagogue utilise ensuite le modèle du malade pour établir le programme de rééducation. On suppose durant cette étape que le contenu du modèle varie peu (les progrès des malades sont lents) [MAS 90]. Les exercices présentés sont en rapport avec les difficultés du malade, méthode pédagogique et hiérarchie des apprentissages s'inspirent directement des méthodes employées en rééducation (cf. Annexe A et chap. II),
- L'Interface Homme-Machine joue également un rôle très important dans un tuteur de rééducation. Cette constatation vraie pour n'importe quelle application a par ailleurs déjà été faite dans le chapitre II. Comme il s'agit ici de rééduquer des troubles du langage qui peuvent être écrits ou oraux, l'utilisation du langage naturel tel qu'il a été employé dans SCHOLAR [CAR 70] ou SOPHIE [BRO 82] peut paraître toute indiquée. Le caractère imprévisible des productions de certains malades (paraphasies cf. I.3.3.1.4, néologismes cf. I.3.3.1.5, etc.) montre que l'analyse des réponses des malades peut s'avérer fastidieuse sinon impossible car elle peut dépasser le cadre sémantique de l'application. Nous avons par exemple rencontré la situation suivante : alors que l'on demandait à un patient de dire si le mot à l'écran, en l'occurrence "onze", lui semblait correspondre à un nombre, celui-ci réfléchit à haute voix ("singe, c'est un animal ça, c'est pas un nombre") et répondit de façon erronée. Des techniques plus simples, à base de menus comme le suggèrent Nicaud et Vivet [NIC 88] peuvent suffire. Cela peut paraître quelque peu limité dans le cadre de notre application, où l'on se cantonnerait à aborder l'aspect compréhension du langage. Toutefois, on peut trouver une solution

intermédiaire en demandant au patient d'effectuer des mouvements volontaires (déplacements d'items) afin de produire une réponse à partir d'éléments déjà écrits (réorganisation d'éléments). C'est dans cette optique qu'a été conçue l'interface de L.A.R.A. (Logiciel d'Aide à la Rééducation des Aphasiques).

IV.2 Objectifs

Nos objectifs sont de mettre en place un système permettant de réaliser l'évaluation et/ou la rééducation de troubles neuropsychologiques chez les patients cérébro-lésés. L'évaluation en neuropsychologie cherche essentiellement à :

- 1) situer et quantifier les déficits des malades. C'est la condition préalable à leur prise en charge et à l'évaluation de la récupération,
- 2) étudier les modalités de représentation de l'information et la nature des traitements effectués par le système cognitif humain. Comme nous l'avons indiqué précédemment (cf. III.4.1), la sélectivité des perturbations occasionnées par une lésion cérébrale en font une fenêtre d'étude privilégiée du fonctionnement cognitif humain.

La réalisation de ces deux buts suppose la mise au point d'un outil adaptatif permettant la réalisation de tests. Ces tests sont bâtis sur une connaissance préalable des déficits des malades et doivent être adaptables afin de tester des hypothèses spécifiques concernant le fonctionnement cognitif. Dans le cadre de la rééducation, la nécessité de délivrer des "exercices" orientés afin de redévelopper des fonctions déficitaires suppose également une adaptation aux déficits propres à chaque patient ainsi qu'aux niveaux de performance de chacun de ces patients pour la fonction considérée. Cela sous-entend la possibilité d'avoir une progression dans la difficulté et dans la quantité d'informations à traiter, mais aussi la nécessité de pouvoir présenter un grand nombre d'exercices eux-mêmes constitués de nombreux stimuli.

Plus généralement, la mise au point de systèmes informatisés d'évaluation/rééducation doit répondre à des impératifs de :

- spécificité des fonctions testées et rééduquées. Or, les déficits associés sont fréquents. Il faut donc s'assurer que l'évaluation ou la rééducation porte bien sur la fonction considérée et non pas sur les déficits associés,
- simplicité d'utilisation pour le thérapeute et pour le patient. Il importe pour ce dernier que le système soit bien accepté, qu'il tienne compte des déficits associés



(perceptifs, moteurs, cognitifs, etc.) et que la durée des épreuves soit parfaitement calibrée (fatigabilité),

- convivialité, surtout en cas d'utilisation fréquente (rééducation),
- fiabilité pour constituer un outil performant d'évaluation (les dysfonctionnements découragent les malades).

Masson [MAS 90] a montré l'importance de la modélisation de l'élève lors de la réalisation d'un tuteur de rééducation et présenté les solutions envisageables. Pour notre part, nous avons axé nos travaux sur l'interactivité entre la machine et un apprenant susceptible de présenter des déficits réceptifs (hémiparésie, agnosie), spatiaux, moteurs ou une aphasie. La communication entre une machine et une personne dont le trouble majeur touche justement le langage nous paraît être la première difficulté à franchir avant d'envisager l'évaluation sinon le traitement des troubles qui affectent un malade. Nous avons dépeint par ailleurs les possibilités qui s'offrent à nous en matière de dialogue homme-machine (chapitre II). L'utilisation de ces possibilités dépend de la nature des épreuves que l'on envisage de proposer aux malades, de la gravité des troubles observés chez les malades et en dernier lieu des limites technologiques et d'analyse des productions linguistiques des malades.

La voie que nous avons privilégiée dans L.A.R.A. est celle d'un dialogue écran-souris, via une interface graphique. C'est le mode de dialogue le plus répandu actuellement (cf. II.3.1.2). Un mode de dialogue qui s'adresse ici à deux types bien différents d'utilisateurs : le thérapeute en charge de la prescription des exercices au malade et de l'exploitation informatisée des résultats, ainsi que le malade lui-même.

Vouloir utiliser un ou des moyens de communication privilégiés entre un micro-ordinateur et les malades est une chose, il importe également de créer des applications en rapport avec les déficits observés chez les malades et de montrer qu'un micro-ordinateur peut être une aide appréciable pour le malade et le thérapeute. A cette fin, le logiciel L.A.R.A. a pour objectif **d'étudier les capacités de patients cérébro-lésés à porter un jugement et à produire une réponse** dans différentes situations (mots-nombres, suites de formes géométriques, etc.). L'utilisation d'outils d'Intelligence Artificielle, en l'occurrence ici le générateur de systèmes experts Snark Open, permet d'évaluer plus qualitativement que quantitativement les performances des malades. L'évaluation du malade s'en trouve améliorée puisqu'on se donne les moyens de se concentrer davantage sur la compréhension de la logique utilisée par le malade, donc sur la perturbation du "raisonnement", alors que la connaissance de ses pourcentages de réussite ne permet de mesurer que l'étendue du déficit.

Le fonctionnement du langage est trop complexe et surtout trop inconnu encore pour pouvoir être décrit. Or, les mots-nombres constituent un domaine formel limité dont la simplicité (une trentaine de mots et autant de règles grammaticales permettent de les analyser ou de les produire, et ce sans ambiguïté) devrait faciliter la compréhension de la logique sous-jacente aux productions des malades, mais aussi dont les irrégularités devraient favoriser des erreurs telles que la généralisation, l'inversion, l'ajout, l'omission voire la substitution de règles grammaticales. D'autre part, ces épreuves qui paraissent simples pour tout un chacun, s'avèrent déjà très complexes à réaliser par les malades : en production de mots-nombres, il est parfois difficile de réaliser une réponse syntaxiquement correcte qui comprenne l'ensemble des éléments de l'item. Et trouver la solution, c'est à dire l'expression qui correspond à la quantité la plus grande parmi toutes les propositions syntaxiquement correctes qu'il est possible de réaliser, est pour certains d'entre-eux une difficulté parfois insurmontable.

Une partie des épreuves intégrées actuellement au système L.A.R.A. sera donc relative au traitement des mots-nombres. On y trouvera aussi des épreuves utilisant des symboles géométriques.

IV.3 Architecture générale de L.A.R.A.

IV.3.1 Présentation

En rééducation des aphasiques, contrairement à l'E.I.A.O. standard, il n'est pas possible de laisser le malade seul face à la machine pour une raison simple : le malade n'est pas en mesure de décider lui-même des exercices qu'il doit choisir, d'autant plus qu'il peut ne pas avoir conscience de son trouble (anosognosie). Le système L.A.R.A. s'adresse donc à deux catégories de publics : thérapeutes et malades et les besoins des uns ne sont pas ceux des autres et inversement. Le système s'articule principalement autour de trois modules : un gestionnaire de menus, un système d'exploitation des résultats (performances du patient) et un tuteur, ou plutôt un ensemble de tuteurs spécialisés chacun dans un aspect du domaine d'étude envisagé (jugement et production de nombres, de suites ordonnées de formes géométriques).

Chacune de ces réalisations demande une démarche conceptuelle et une architecture particulière : le système doit être personnalisé (pour chaque malade) mais aussi flexible dans le sens où il doit accueillir le plus grand nombre d'utilisateurs [NIC 88]. La flexibilité de réalisation des sous-systèmes doit également être à l'honneur car chacun d'entre eux utilise à tous les niveaux (modélisation du domaine, modélisation de l'élève, pédagogie, interface Homme/Machine) des savoirs ou des savoir-faire que l'on retrouve entièrement ou partiellement dans les autres tuteurs. De plus, ces systèmes sont en constante évolution et leur élaboration se fait progressivement. Flexibilité doit alors être entendue dans les sens d'une

d'une facilitation de la mise à jour (modification de l'existant ou adjonction de connaissances nouvelles) des différents tuteurs. La prise en compte de l'ensemble de ces considérations nous pousse bien évidemment à utiliser des outils d'intelligence artificielle.

IV.3.2 Un outil au service du thérapeute

L.A.R.A. est un moyen d'investigation proposé au thérapeute. Dans un premier temps, les adeptes des méthodes de rééducation dites de rétablissement ont vu dans le micro-ordinateur un moyen de proposer des exercices aux malades à de nombreuses reprises dans des conditions toujours identiques. C'était une initiative intéressante, car nous savons que l'entraînement intensif des malades est une condition inévitable en rééducation. Mais, proposer des exercices standards ou des méthodes rigides ne va pas dans le sens d'une adaptation pourtant nécessaire du programme thérapeutique au malade. Il faut donc que le thérapeute dispose d'un outil suffisamment souple afin qu'il puisse bâtir un programme thérapeutique "sur mesure". L'emploi de techniques d'intelligence artificielle vient à point nommé. Non seulement cela permet aux experts de réaliser des logiciels qui utilisent leurs savoirs et savoir-faire à bon escient, mais, cela leur permet également d'avoir à leur disposition des systèmes qui réagissent comme le malade, et améliorent par conséquent leur connaissance de la pathologie.

Le rôle du thérapeute en tant qu'utilisateur de L.A.R.A. est celui d'un gestionnaire. Il gère :

- la sélection des exercices (évaluation ou rééducation), en clair le programme qu'il prévoit pour un malade, variable en fonction des déficits observés chez celui-ci,
- l'exécution par le malade des exercices qu'il a sélectionnés,
- l'exploitation des résultats des malades.

Dans son ensemble, ce processus est bien déterminé. Il peut être représenté par un automate à états finis dont la matérialisation s'effectue sous forme de menus dont nous présentons ici l'état de départ (Figure IV.1).

Le rôle du thérapeute ne se limite évidemment pas à cela. Il permet au système d'évoluer et de progresser dans le fond sinon dans sa forme. Il représente en effet celui dont les connaissances expertes sont modélisées et utilisées par le logiciel.

IV.3.3 Un outil au service du malade

On serait tenté de dire que L.A.R.A. comme tout système de rééducation assistée par ordinateur ou non est avant tout un outil au service du malade. Le malade, s'il ne fait

qu'exécuter les sessions qui lui ont été prescrites par le thérapeute, n'a pas pour autant un rôle passif. Cette activité ne se mesure pas en initiatives que le malade est autorisé à prendre au sujet du choix des exercices ou de l'exploitation de ses résultats, mais plutôt en décisions qu'il est amené à prendre pour résoudre les épreuves qu'on lui soumet. Si cette démarche est identique pour le patient en évaluation ou en rééducation, il n'en est pas de même pour le système. Selon qu'il s'agit d'une phase d'évaluation (pré-test, post-test) ou de rééducation le fonctionnement du système différera quelque peu. En effet, en évaluation, le tuteur ne fait que recueillir les réponses du malade à une batterie d'items fixe (afin de garantir des conditions identiques pour chaque malade et donc une base de comparaison de performances), sans faire écho de la nature de ses réponses. Le tuteur observe le malade sans le guider ni lui donner la possibilité de douter de ses productions, et par conséquent de les corriger.

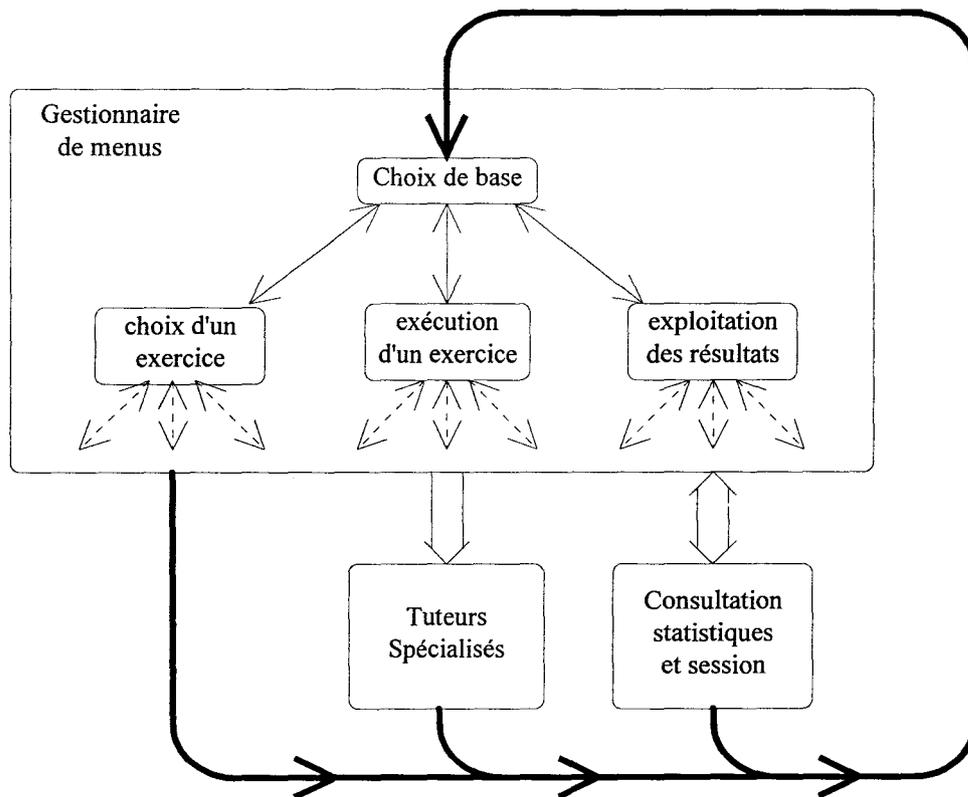


Figure IV.1 : Architecture générale de L.A.R.A.

Ce n'est pas le cas en rééducation. On laisse alors une liberté plus grande au tuteur qui établit le modèle de l'apprenant et choisit lui-même les items à présenter au malade en fonction d'un ensemble de prérogatives pédagogiques liées bien sûr aux déficits observés et à la progression du malade (cf. Fig. IV.2). L'interaction avec l'élève est ici plus forte mais limitée car l'explication des raisonnements pathologiques des apprenants ne peut se faire de façon explicite en raison de la nature de leurs troubles qui affectent le langage. Il s'agit alors d'amener le malade à corriger ses erreurs de lui-même en provoquant des procédures

d'autocorrection : on peut amener le malade à s'interroger à propos de réponses contradictoires (aphasiques de Broca) ou le guider vers la correction en repositionnant l'item dans son contexte (aphasiques de Wernicke) [MAS 90].

IV.4 Description d'un tuteur

IV.4.1 Présentation

Pour simplifier la réalisation des différentes bases de connaissances qui composent à l'heure actuelle le système L.A.R.A., il a été décidé de décomposer le dispositif en autant de bases de connaissances que de types d'exercices existants, en l'occurrence, quatre sous-systèmes pour l'instant : production de nombres, production de formes, jugement de nombres et jugement de formes.

Chacun de ces tuteurs s'inscrit dans le cadre d'une structure générale (cf. Fig. IV.2), mais nécessite bien sûr des adaptations en fonction du type d'exercice (jugement ou production) et du domaine d'application (mots-nombres, formes géométriques).

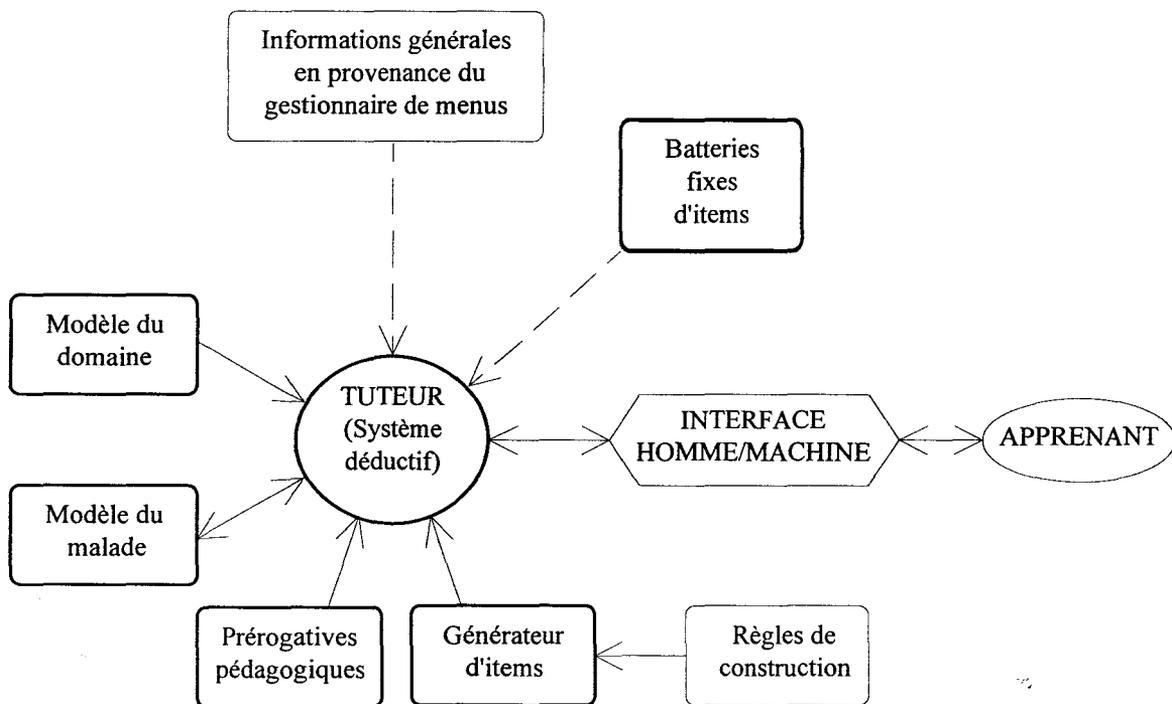


Figure IV.2 : Architecture actuelle d'un tuteur.

On reconnaît dans cette architecture les quatre éléments principaux d'un tuteur intelligent (modèles du domaine et de l'élève, pédagogue et I.H.M.). A ceux-ci s'ajoutent deux modules contradictoires (générateur d'items et batteries fixes d'items), ce qui laisse sous-entendre deux modes de fonctionnement différents du tuteur (rééducation et évaluation sommative pré ou post-traitement). Enfin, on trouve un module de liaison entre le gestionnaire

de menus et le tuteur qui permet à ce dernier d'avoir accès à l'ensemble des informations nécessaires à l'exécution d'une session : identité du malade, type (mots-nombres/formes géométriques) et mode (évaluation/rééducation) d'exercice, nom du fichier résultat de la session.

IV.4.2 Le modèle du domaine

Le modèle du domaine comprend les éléments qui permettent au système :

- de juger de la nature correcte ou non des réponses du malade, et donc d'interpréter qualitativement la réponse du malade,
- de bâtir la solution attendue,
- de poser des hypothèses sur les raisonnements pathologiques des malades,
- de décider des items nécessaires à la rééducation du malade en fonction du modèle de ce malade,
- de créer à tout instant un item (en faisant appel au générateur d'items), pour vérifier une hypothèse sur un aspect de la pathologie du malade, ou pour réaliser sa rééducation.

IV.4.3 Le modèle du malade

L'état de connaissance de l'élève est consigné dans un modèle propre à chaque élève, établi lors de la phase d'évaluation. Ce modèle individualisé contient les éléments pathologiques que le système est actuellement capable de mettre à jour par l'entremise des connaissances de l'expert du domaine qui ont été introduites dans le système. Deux types d'informations apparaissent dans ce modèle. On a d'une part des informations quantitatives représentées par les scores du malade en fonction de différents critères (longueur des items, catégories lexicales, liens syntaxiques, etc.) et d'autre part une interprétation qualitative des erreurs commises (caractéristiques des erreurs).

L'évaluation de l'élève nécessite d'utiliser un protocole fiable et reproductible.

Un système informatique faisant appel à des outils d'intelligence artificielle est à même de détecter les réponses contradictoires des malades et donc capable de vérifier les hypothèses qu'il a émises. Pour cela il faut que la batterie de test utilisée soit dynamique et que le système puisse générer le stimulus idéal permettant de vérifier ses hypothèses. Cela permet également de détecter les réponses aléatoires ou dont l'origine est liée à une mauvaise saisie (clavier ou autre) et donc non pathologique.

Dans un système de rééducation, le modèle de l'élève est réutilisable d'une session à l'autre car l'évolution de ce modèle est lente, en rapport avec la lenteur des progrès réalisés par les malades.

IV.4.4 Le pédagogue

IV.4.4.1 Généralités

Le module pédagogique, en phase d'élaboration, contient le matériel et les stratégies à employer dans le cadre d'un programme thérapeutique. Le pédagogue doit être en mesure de proposer un programme individualisé à chaque malade. Cette adaptation passe d'abord par une structuration granulaire et hiérarchisée du programme telle qu'elle permette de tenir compte des différents déficits observables chez tous les malades. Ensuite, et au cas par cas, il faut pouvoir extraire ce qui est nécessaire au malade en fonction du modèle de celui-ci. On applique alors des stratégies qui tiennent compte de l'évolution des performances du malade. Cette évolution d'un niveau de élémentaire de programme à l'autre peut revêtir trois aspects : soit le malade progresse, auquel cas on peut se demander s'il n'est pas possible d'accélérer le programme et de "shunter" des niveaux, soit le malade stagne ou pire régresse, auquel cas il s'agit de comprendre pourquoi. Cela peut par exemple être résolu par l'insertion d'une étape intermédiaire, le renvoi au dernier niveau effectué, voire à un retour en arrière bien plus important.

Le rôle du pédagogue dans L.A.R.A. est double. On lui associe une première tâche qui consiste à faire l'évaluation des connaissances préservées et abolies du malade, en clair l'établissement du modèle de l'élève. On parle alors de session d'évaluation. L'autre rôle qui lui est dévolu est bien entendu la rééducation.

IV.4.4.2 Session d'évaluation

Une session d'évaluation (pré-test ou post-test) se déroule avec une base d'items fixe, donc limitée en nombre d'éléments. Cela permet toutefois d'avoir des conditions d'investigation identiques et reproductibles pour tous les malades, ce qui autorise à effectuer des comparaisons entre pré-test et post-test pour un malade donné (indicateur de progression) ou entre malades, malgré l'hétérogénéité qui caractérise cette population. Nous profitons de cette étape pour bâtir un premier modèle de l'élève. On émettra tout de même quelques réserves sur la nature des informations présentes dans cette base de faits puisqu'en évaluation, du fait du caractère figé de la séquence des items, nous n'avons pas les moyens de confirmer ou de remettre en cause ces informations. Les contradictions peuvent d'ailleurs avoir des

origines diverses (erreur d'inattention dont le malade prend conscience ou non après coup, production aléatoire).

Le déroulement d'une session d'évaluation comprend quatre étapes qui se déroulent de manière cyclique :

- la *présentation d'un item*. Celui-ci est issu d'une base que l'on parcourt suivant un ordre prédéfini afin d'avoir une base de comparaison entre les différents malades,
- l'*enregistrement de la réponse du malade*. Il se déroule à deux niveaux. La réponse est transmise au système expert en vue d'analyse et à un "mouchard" qui enregistre physiquement dans le fichier résultat du malade pour la session en cours chaque action validée d'un clic souris effectuée par le malade ainsi que le temps écoulé depuis la dernière action,
- le *traitement de la réponse*. Le système expert se sert ensuite de sa connaissance du domaine pour analyser l'item et la réponse du malade,
- la *mise à jour du modèle initial du malade*. Le modèle du malade consiste, en ce qui concerne les nombres du moins, à donner une représentation de ses performances en fonction de variables linguistiques (longueur des items, catégories lexicales, règles syntaxiques et traits sémantiques additifs ou multiplicatifs préservés ou altérés). Ces informations sont intégrées au fur et à mesure dans une base de faits qui est sauvegardée en fin de session et donc consultable.

IV.4.4.3 Session de rééducation

La principale différence entre une session d'évaluation et une session de rééducation provient du fait que la base d'items n'est pas fixe dans le cas présent. Cela permet au système de personnaliser la session en ayant la possibilité de bâtir un modèle de l'élève en fonction des critères que nous observons (longueur des items, types d'erreurs syntaxiques et éventuels problèmes sémantiques) à partir d'items judicieusement choisis par le système. La possibilité attribuée au système de choisir les items permet d'affiner ce modèle en vérifiant et éventuellement en remettant en cause (back-tracking) les différentes hypothèses établies.

Par la suite, nous pensons que la lenteur de progression des aphasiques nous autorise à conserver le modèle ainsi réalisé.

La rééducation doit alors comprendre autant de séances que nécessaire, chaque séance servant à traiter un point bien spécifique du programme (Cf. III.6). Par exemple pour les mots-nombres : les associations additives de deux mots de type "dizaine simple/unité", etc., les associations multiplicatives de deux mots de type "unité/centaine", etc., puis des structures à trois, quatre mots).

IV.4.4.4 Aide apportée au malade en rééducation

En rééducation, il est essentiel de donner au malade les moyens de se rendre compte des erreurs qu'il commet tout en sachant qu'il n'est pas possible de lui expliquer directement ni la nature de l'erreur ni comment l'éviter.

Certaines méthodes de rééducation (cf. II.4.6) ont vu l'aide apportée au malade sous la forme de facilitations. C'est à dire qu'on propose une même série d'items plusieurs fois au malade avec une aide qui s'estompe progressivement. La solution que nous avons envisagée diffère de cette approche dans la mesure où l'aide apportée dans L.A.R.A. n'apparaît qu'après que le malade ait formulé sa réponse. Selon la nature de l'épreuve à laquelle nous soumettons les malades, elle peut s'avérer plus ou moins riche. Cette richesse va d'ailleurs non pas en s'amenuisant, mais au contraire en augmentant. L'intérêt de cette démarche est de privilégier l'autonomie du patient. Si cela n'est pas possible, alors nous intervenons progressivement :

- en *production*, après que le malade ait validé sa réponse, le système lui indique la nature de cette réponse ("correcte" ou "fausse") tout en laissant la réponse à l'écran. Cela permet de conforter le patient dans son raisonnement si celui-ci est correct ou au contraire de lui permettre de s'interroger sur le type d'erreur qu'il a pu commettre. Dans ce dernier cas, une procédure d'aide est mise en oeuvre afin que le patient puisse arriver à la solution lors des essais suivants (pour le même item bien évidemment). Cette aide consiste dans un premier temps (3 premiers essais infructueux) à lui montrer la solution pendant quelques secondes (cf. Fig. IV.3), solution qu'il pourra comparer à sa production puisque celle-ci reste à l'écran. Si cela s'avère insuffisant et que le patient a besoin d'autres tentatives pour arriver à la solution, un élément de la solution attendue sera alors laissé définitivement à l'écran en bonne position en partant de la gauche à chaque essai infructueux (cf. Fig. IV.4). Cette façon de procéder ne laisse cependant pas le malade inactif puisqu'il lui faut tout de même créer la solution à l'image de ce qui est attendu, avant de pouvoir passer au stimulus suivant. Notons au passage qu'à chaque nouvel essai, on affiche la dernière réponse fausse qu'il a produite, ce qui constitue une aide de prime abord sur ses propres raisonnements (cf. Fig. IV.4). En ne tenant pas compte de la zone "exploitation", quatre zones ("Formes" ou "Nombres" selon le cas, "Les xx premiers éléments", "Votre réponse fausse était" et "Réponse") apparaissent alors. Cela peut paraître beaucoup dans un premier temps pour certains malades qui sont perdus à la vue d'autant d'informations. Ce problème, rencontré en évaluation par les patients qui désiraient corriger leurs productions se réglait néanmoins très vite. Il est vrai qu'on avait une fenêtre de moins ("Les xx premiers éléments"), mais cela ne nous semble pas être un

problème insurmontable. Plus dramatique est alors le fait que le patient peut ne pas être réceptif à ces aides,

- en *jugement*, il en va différemment. La réponse du malade consiste simplement à répondre à une consigne du type : "La suite vous paraît : bonne, mauvaise, je ne sais pas ?". La solution dans ce cas là est soit "bonne" soit "mauvaise". On indique donc tout simplement cette solution en vis-à-vis de la réponse du malade, en prenant soin d'effacer les autres choix qui étaient à la disposition du patient. Nous tablons alors sur l'apparence de l'information pour faire réagir le malade. Si le malade a répondu correctement sa réponse et la solution apparaissent dans un même plan horizontal, alors que si le malade s'est trompé, réponse et solution sont décalées en hauteur (cf. Fig. IV.5). L'effort visuel engendré pour comparer réponse et solution peut alors contribuer à une prise de conscience de la nature erronée de la réponse. C'est ici la seule information transmise au malade et nous n'indiquons pas la nature de l'erreur contenue dans la réponse du malade le cas échéant.

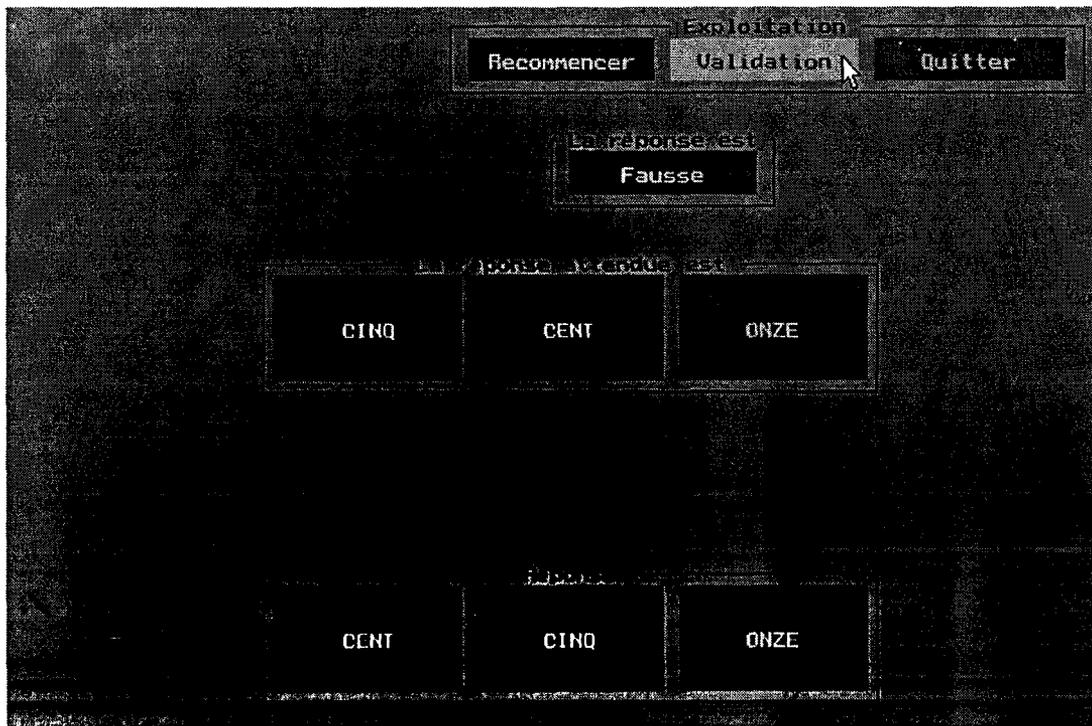


Figure IV.3 : Aide en production (nature de la réponse et la présentation de la solution).

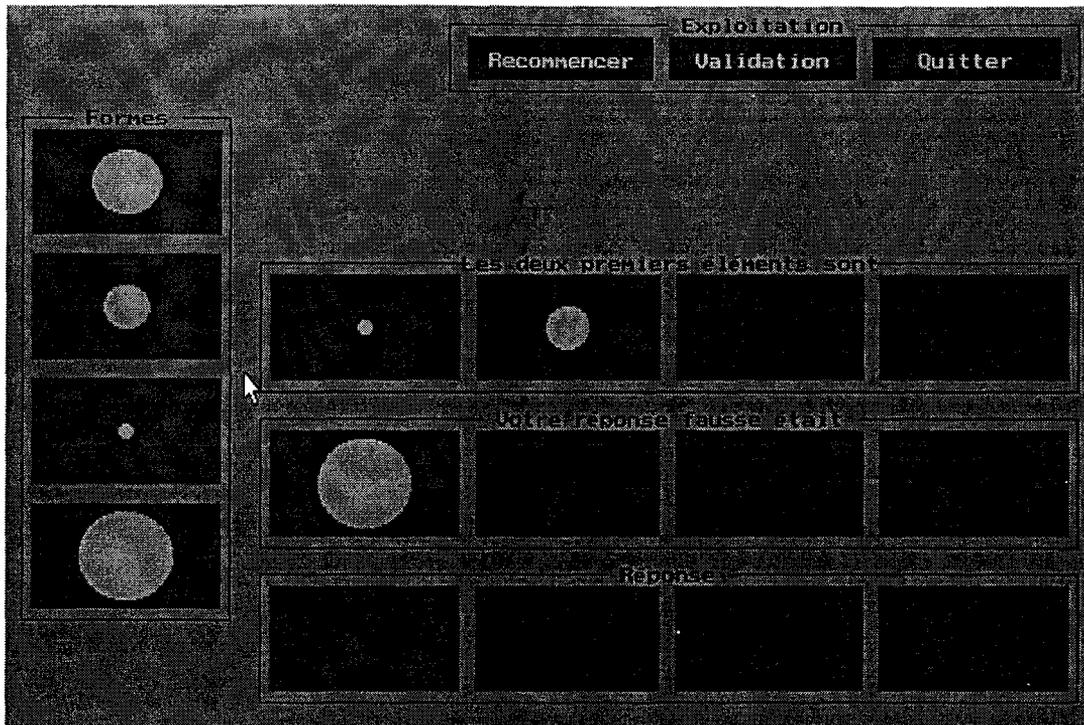


Figure IV.4 : Aide en production (éléments de la réponse et réponse précédente).

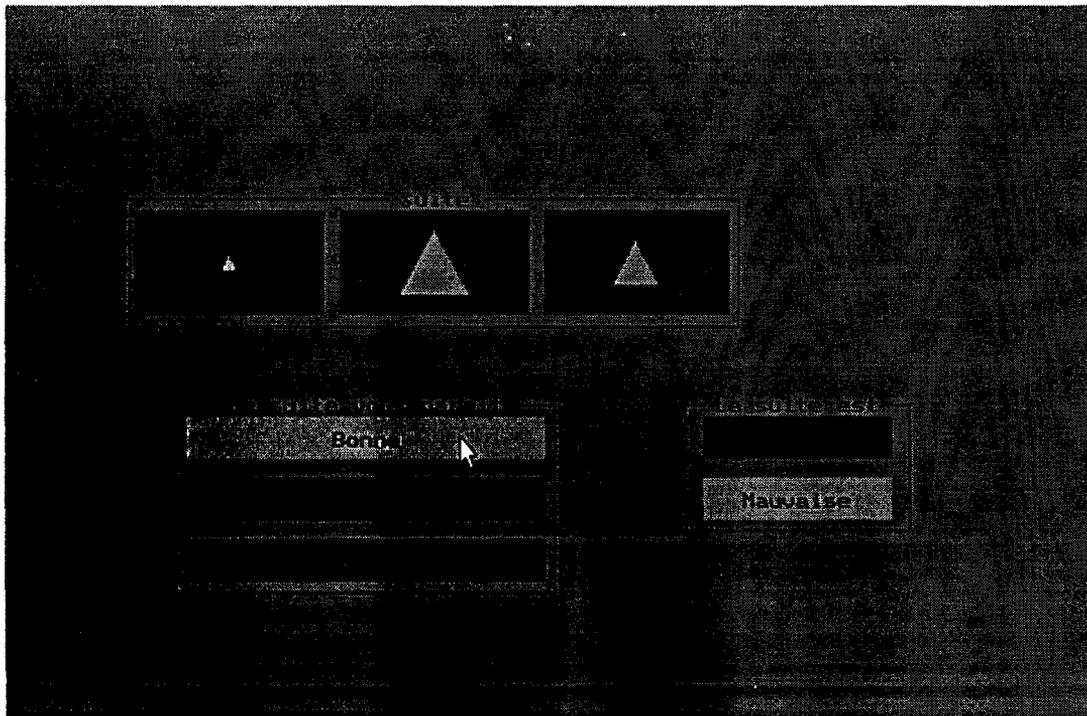


Figure IV.5 : Aide en jugement.

IV.4.5 Le générateur d'items

Le générateur d'items permet de réaliser l'item dont le dispositif a besoin au moment précis de la demande, en fonction des éléments sur lesquels le dispositif veut insister. Ce

générateur est constitué d'un ensemble de règles de productions qui permettent de réaliser les structures existantes. Par exemple, dans une épreuve de production de mots-nombres, il existe une règle (cf. Fig. IV.6) qui permet de générer un stimulus de trois éléments permettant de réaliser un mot-nombre du type *Unité CENT Unité*. Les caractéristiques de ce stimulus sont :

- le nombre d'éléments (trois) et leur classe lexicale (Unités et CENT),
- le type de liaisons syntaxiques (Unité CENT et CENT Unité),
- la combinaison sémantique (multiplication puis addition).

Sur cette figure on voit apparaître des informations de type *noeud_sémantique_ideal* ou *total_noeud_x*. Elles correspondent à des réponses qu'il est possible de donner avec la totalité ou non des éléments de l'item (au moins deux pour avoir un lien syntaxique) que nous avons représentées dans une structure arborescente (cf. Fig. IV.7). Chaque noeud de cet arbre prend pour valeur un des mots de la réponse et chaque branche représente le lien sémantique qui relie deux éléments consécutifs (un noeud est situé sur un niveau indiquant la position de cet élément dans le mot-nombre, ou le nombre d'éléments que contient le mot-nombre, si ce mot est le dernier). Ce que nous avons appelé *noeud_sémantique_ideal* correspond à la structure sémantique idéale (ici "*" "+" comme dans $4 * 100 + 3$). Si nous prenons les trois mots "QUATRE", "CENT" et "TROIS", plusieurs alternatives sont réalisables :

- "QUATRE CENT" correspond au noeud 2 (lien multiplicatif) et deux réponses de ce type sont possibles. Voilà pourquoi le fait *TOTAL_NOEUD_2* de cet item prend la valeur 2 dans la règle décrite figure IV.6,
- "CENT QUATRE" correspond au noeud 3 (lien additif). Il y a là aussi deux réponses possibles,
- "TROIS CENT QUATRE" correspond au noeud trois. Ce n'est pas la solution optimale, mais la sémantique de cette expression correspond à celle attendue. Il y a là aussi deux solutions possibles.

Ces indications permettent au système de savoir le nombre de combinaisons réalisables avec les éléments de l'item proposé et les structures auxquelles on aboutit. Elles peuvent ensuite être utilisées par le système afin de déterminer un indice de complexité ou de vérifier si le malade privilégie une structure plutôt qu'une autre, etc.

En jugement, le générateur d'énoncés est également capable grâce à des connaissances issues de la pathologie (généralisation, omission, inversion, substitution de règles syntaxiques) de produire des items qui concordent avec les troubles observés chez les malades (par exemple générer un item du type "NEUF ZERO CINQ", i.e. 905). Pour cela, nous partons des connaissances transmises par l'expert et constituons un catalogue d'erreurs qu'il est possible d'agrémenter en fonction des nouvelles situations pathologiques rencontrées.

```

REGLE : (2..9) * 100 + (1..9)
SI  GENERER NOEUD = 5
    5  CHOISIR = 4
    TYPE  (unit1) = UNITE
    VALEUR  (unit1) > 1
    TYPE  (unit2) = UNITE
    VALEUR  (unit2) <= VALEUR (unit1)
    NOMBRE  ITEM  = (ni)
ALORS
    VALEUR1  ITEM <-- (unit1)
    VALEUR2  ITEM <-- (unit2)
    VALEUR3  ITEM <-- CENT
    VALEUR4  ITEM <-- VIDE
    ELEMENT1  ITEM <-- (unit1)
    ELEMENT2  ITEM <-- CENT
    ELEMENT3  ITEM <-- (unit2)
    ELEMENT4  ITEM <-- VIDE
    LONGUEUR  ITEM <-- 3
    NOEUD_SEMANTIQUE_IDEAL (ni) <-- 5
    TOTAL_NOEUD_5 (ni) <-- 2
    TOTAL_NOEUD_3 (ni) <-- 2
    TOTAL_NOEUD_2 (ni) <-- 2
FR

```

Figure IV.6 : Règle de production d'un item de trois éléments de type "Unité CENT Unité".

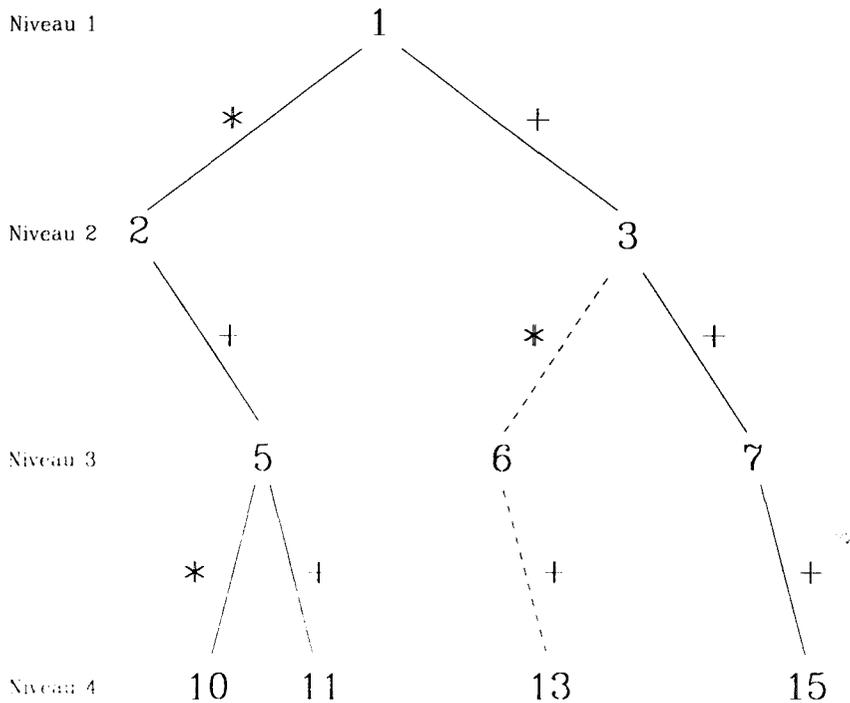


Figure IV.7 : structures sémantiques des mots-nombres (quantités <1000).

IV.5 L'Interface Homme/Machine de L.A.R.A.

IV.5.1 Présentation

D'une façon générale, la communication avec les personnes atteintes de troubles du langage (et davantage encore en rééducation) est difficile et se doit d'intégrer l'ensemble des modes de communication de l'homme (langue écrite ou textuelle, parole, image, geste) pour une raison simple, ces troubles peuvent affecter le langage sous toutes ses formes. Lorsque cette communication a lieu entre un malade aphasique et un ordinateur, on parle alors de communication multimodale sensorielle et motrice et le développement de méthodes et d'outils dédiés à cet effet fait actuellement le fruit de nombreuses recherches en communication homme-machine.

L'objectif de départ de L.A.R.A. était de réaliser une interface de communication homme-machine fiable, performante, facilement utilisable et par conséquent simple d'apprentissage afin de pouvoir toucher la population de malades la plus large possible. En fait, nous devrions parler d'interface de communication au pluriel, car comme nous l'avons dit plus haut, L.A.R.A. est multi-utilisateur (thérapeute, malade). La conception de l'I.H.M. de L.A.R.A. place donc deux types d'utilisateurs au centre de l'étude.

Le thérapeute a un rôle planificateur, une I.H.M. à base de menus se voyait donc toute indiquée à son égard.

Quant à l'interaction avec les malades, nous nous sommes orientés vers une interface à manipulation gestuelle donc indépendante du langage écrit ou oral, du moins pour l'instant et pour des épreuves de production écrite ou de jugement. La décision arbitraire d'utiliser ce mode d'interaction ne nous garantissait aucunement son adaptation aux malades, nous avons donc procédé à des études d'usage qui sont commentées par la suite (cf. chapitre V).

IV.5.2 Communication thérapeute-machine

IV.5.2.1 Parcours de menus

Dans L.A.R.A., le thérapeute choisit les exercices pour les malades, décide de leur exécution, exploite les résultats des malades et éventuellement personnalise le logiciel. Ces activités sont présentées sous forme d'un menu (menu principal, fig. IV.8).

La communication entre L.A.R.A. et le thérapeute se fait par l'intermédiaire de menus hiérarchisés en une succession de sous-menus thématiques (cf. Fig IV.8). Chaque menu est constitué de trois parties : un en-tête, un ensemble de choix possibles en rapport avec le thème qui soit dirigent l'utilisateur vers un autre menu, soit réalisent une action et enfin une possibilité de retour au menu précédent.

Un seul menu est consultable à la fois, et dans un souci d'efficacité et de lisibilité :

- chaque en-tête de menu et chacun des choix possibles sont écrits explicitement tout en restant concis (de un mot jusqu'à la possibilité d'avoir trois lignes de texte par fenêtre),
- le menu de départ (menu principal) contient l'ensemble des possibilités de L.A.R.A.. Ce menu est incontournable et on y revient systématiquement après l'exécution de l'un de ses contenus (choix d'un exercice, exécution d'un exercice, etc.),
- chacun des menus qui suivent le menu principal montre lui aussi l'ensemble des possibilités offertes à l'utilisateur dans cette rubrique. L'apprentissage du système s'effectue ainsi avec un minimum de connaissances à son sujet,
- la quasi-totalité du dialogue se fait par pointage et sélection avec la souris. On empêche ainsi toute entrée d'information incohérente ou erronée,
- l'utilisation du clavier est minimale et réservée à l'entrée de l'identité du malade et du nombre maximal d'items que comptera la session d'exercice,
- le déplacement de la souris est limité aux fenêtres pouvant être sélectionnées dans le menu actif. Comme celles-ci sont généralement placées les unes en dessous des autres, un simple mouvement vertical de la souris permet d'effectuer une sélection, ce qui constitue un gain de temps et de précision appréciable et ne justifie pas l'emploi de touches raccourcis. Toutefois et malgré les options possibles pour chaque exercice, l'utilisation de macrocommandes constituerait un plus non négligeable pour un utilisateur patenté, notamment pour la sélection d'exercices,
- le titre du menu actif a une couleur différente des menus précédents,
- la fenêtre courante d'un menu (celle où se trouve le curseur de la souris) est en inverse-vidéo,
- chaque menu autorise l'utilisateur à revenir au menu précédent, tout choix peut ainsi être remis en cause,
- l'ensemble des choix effectués par le thérapeute reste visible (inverse-vidéo) autant que cela se peut sur un même écran. On rappelle ainsi le contexte de travail de l'utilisateur. Par cette extension physique de sa mémoire à court terme, on réduit la charge cognitive,
- enfin, l'utilisateur peut agir sur certains paramètres des interfaces (couleurs menus et exercices, curseur et sensibilité souris, etc.) afin de les personnaliser à son usage et à celui des malades.

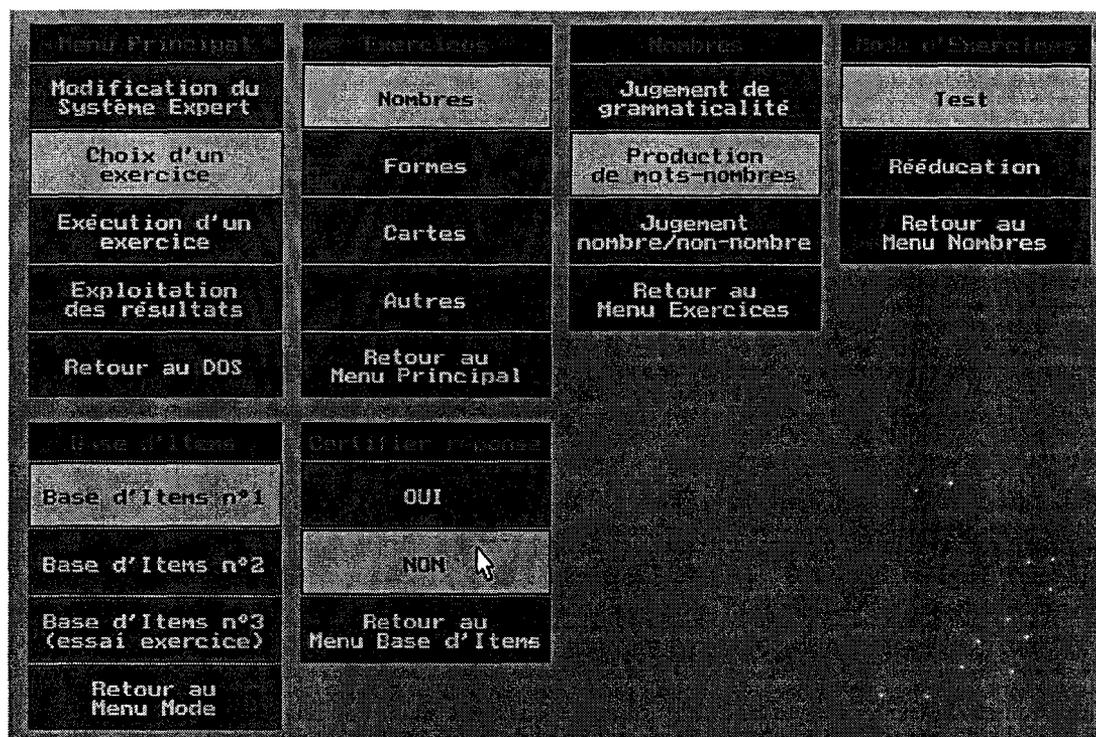


Figure IV.8 : Interface thérapeute-machine.

IV.5.2.2 Exploitation des performances des malades

IV.5.2.2.1 Sous L.A.R.A.

L'exploitation des performances des malades peut s'effectuer individuellement et automatiquement par l'intermédiaire de L.A.R.A. (cf. Fig IV.9). Le thérapeute assiste alors à une mise en forme des données recueillies lors de la session exécutée par le malade (choix et actions que la malade a effectués ainsi que ses temps de réponse).

Il s'en suit l'affichage d'une liste qui comporte trois parties :

- un en-tête qui contient les informations générales de la session : nom, prénom, numéro de la session, etc. (cf. Fig. IV.10),
- un ensemble de statistiques sur les performances du malade (pourcentages de bonnes réponses, moyennes, variance, écart-type des temps de réponse) en fonction des items qui lui ont été présentés. Ces informations et leur présentation dépendent de la nature de l'épreuve (jugement ou production). La figure IV.10, nous présente ici une vue partielle des statistiques pour une session de jugement mot-nombre/non mot-nombre,
- un récapitulatif de l'ensemble des réponses du malade qui comprend l'item présenté et la réponse du malade accompagnée du temps mis par le malade pour donner cette réponse. La figure IV.11 nous présente le récapitulatif d'une session de jugement nombre/non-nombre. La disposition décalée des items à gauche de

l'écran permet de distinguer les items légaux (qui satisfont la consigne), des items illégaux). Trois colonnes (Bon, Mauvais, Ne sait pas) apparaissent en vis-à-vis des items. Les nombres qu'elles contiennent indiquent le temps mis par le malade pour donner sa réponse. La position de ces nombres dans leur colonne respective est un indicateur sur la nature correcte ou non de la réponse : pour la colonne "Bon", la réponse est correcte si le nombre est à gauche (choix de "bon" pour un item légal), et pour la colonne "Mauvais", la réponse est correcte si ce nombre est à droite (choix de "mauvais" pour un item illégal). On peut ainsi très facilement localiser les erreurs du malade en consultant le récapitulatif. La présentation du récapitulatif en production diffère de celle adoptée en jugement : nous y présentons un à un les items ainsi que les différentes tentatives validées par le malade et le temps de réponse total (temps de réflexion et de réorganisation de tous les éléments de l'item ainsi que le temps mis pour valider la réponse) (cf. Fig. IV.12).

La lecture de cette liste, dont la taille est bien supérieure à une page écran, se fait par l'intermédiaire de la souris. A cet effet, l'excursion de la souris est limitée à la partie haute de l'écran qui contient un menu étalé sur une seule ligne. Ce menu permet à l'utilisateur de se balader dans la fiche résultat du malade vers le bas ou vers le haut par ligne ou par page écran. Ce menu comprend également une option d'impression personnalisée puisque le thérapeute a le choix d'imprimer tout ou partie de la liste (en-tête seul ou en-tête et statistiques ou bien encore en-tête et récapitulatif).

IV.5.2.2.2 Sous Microsoft Excel

Le thérapeute peut vouloir effectuer une exploitation plus poussée ou différente des résultats de ses malades. Pour cela, nous lui fournissons autant de fichiers individuels que de sessions effectuées qui peuvent être importés dans Excel. Ces fichiers reprennent bien sûr l'ensemble des informations qui apparaissent dans le récapitulatif disponible dans L.A.R.A. et nous les complétons, du moins en production, des données qui n'y étaient pas nécessaires mais dont nous disposons : longueur des items présentés, temps de réponse intermédiaires (choix d'un élément, déplacement de cet élément, validation), nature de la réponse (d'emblée correcte, finalement correcte, finalement incorrecte).

Cela permet également de comparer les résultats de différents malades entre eux ou par rapport à des témoins sains (cf. Chapitre V).

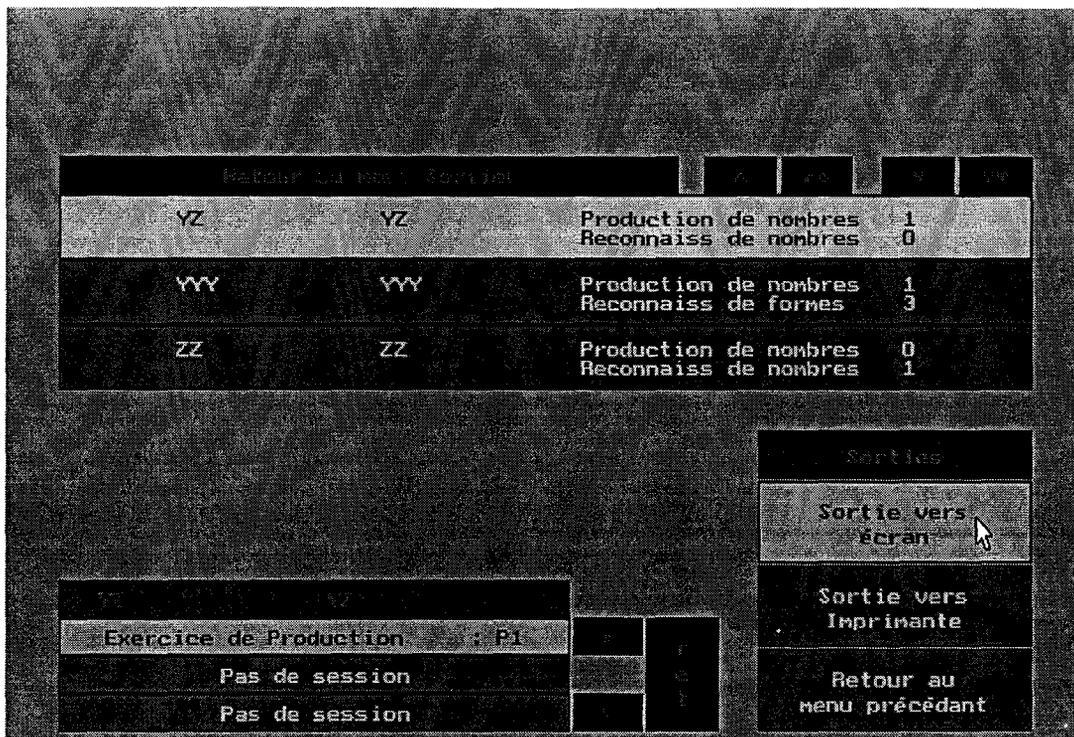


Figure IV.9 : Sélection d'un fichier résultat dans L.A.R.A..

PgUp	PgDn	FnUp	FnDn	Debut	Fin	IMPRESSION	Quitte
Numéro de Session		: 2					
Type de Session		: LEXIQUE : Jugement NOMBRE / NON-NOMBRE					
Mode de la Session		: Test					
Base de Faits choisie		: Bdf 1					
Items exécutés/Items prévus		: 46 / 46					
Durée de la Session		: 59s					
REPONSES POUR L'ENSEMBLE DES ITEMS							
				Légaux (23)		Illégaux (23)	
* Bonne							
Pourcentage / Items		100.00%					
Pourcentage / Réponse		100.00%					
Intervalle T.R. (S)		.76 2.31					
Moyenne T.R. (S)		1.22					
Ecart Type T.R. (S)		.33					
Médiane T.R. (S)		1.10					
* Mauvaise							
Pourcentage / Items		100.00%					
Pourcentage / Réponse		100.00%					
Intervalle T.R. (S)		.77 2.14					
Moyenne T.R. (S)		1.23					
Ecart Type T.R. (S)		.32					
Médiane T.R. (S)		1.15					

Figure IV.10 : En-tête et aperçu des statistiques en jugement.

PgUp	PgDn	LnUp	LnDn	Début	Fin	IMPRESSION	Quitter			
Légal Illégal				ITEM				Réponse et Temps de Réaction (S)		
				Bon Lég. Ill.		Mauvais Lég. Ill.		Ne sait pas Lég. Ill.		
DEUX				2.31						
POIRE						1.75				
CINQUANTE				1.37						
ARBRE						.77				
QUATORZE				.87						
SEIZE				1.27						
CHAISE						1.10				
SEPT				.93						
BALLON						1.32				
DISQUE						1.15				

Figure IV.11 : Récapitulatif en jugement.

PgUp	PgDn	LnUp	LnDn	Début	Fin	IMPRESSION	Quitter
PROPOSITIONS		: NEUF	CENT	SOIXANTE	TROIS	Temps Réponse (S):	
* essai n°1		: SOIXANTE	TROIS			5.17	
* essai n°2		: CENT	TROIS			9.40	
* essai n°3		: NEUF	CENT	SOIXANTE	TROIS	10.71	
PROPOSITIONS		: CINQ	CENT	ONZE		Temps Réponse (S):	
* essai n°1		: CINQ	CENT	ONZE		6.98	
PROPOSITIONS		: VINGT	QUATRE	DIX	HUIT	Temps Réponse (S):	
* essai n°1		: QUATRE	VINGT	DIX	HUIT	9.61	
PROPOSITIONS		: DEUX	QUATRE	CENT	SOIXANTE	Temps Réponse (S):	
* essai n°1		: QUATRE	CENT	SOIXANTE	DEUX	7.63	
PROPOSITIONS		: CENT	QUARANTE			Temps Réponse (S):	
* essai n°1		: CENT	CENT			3.52	
* essai n°2		: CENT	QUARANTE			3.13	
PROPOSITIONS		: SOIXANTE	DOUZE	CENT	QUATRE	Temps Réponse (S):	
* essai n°1		: QUATRE	CENT	SOIXANTE	DOUZE	7.42	
PROPOSITIONS		: CENT	NEUF	CINQ		Temps Réponse (S):	
* essai n°1		: NEUF	CENT	CINQ		4.17	

Figure IV.12 : Récapitulatif en production.

IV.5.3 Communication malade-machine

La communication entre le malade et la machine se fait par l'intermédiaire d'une interface graphique et de l'utilisation en exclusivité de la souris. A ce sujet, comme nous ne cherchions pas à vérifier que les malades étaient capable d'écrire les mots-nombres ou de dessiner les formes géométriques que nous leur propositions, l'utilisation du clavier ou d'un moyen de dessiner ne se justifiait pas.

L'utilisation en exclusivité de la souris (ou de tout autre moyen de pointage ou de sélection) comme nous le disions, nous a permis d'éviter la saisie de réponses incohérentes, inévitables lorsque l'on connaît les troubles qui affectent les malades. Restait encore à vérifier que ce mode de communication s'avérait utilisable avec les malades.

Il est parfois difficile d'expliquer le fonctionnement d'un système aux malades. Pour cela, il faut non seulement simplifier l'utilisation des interfaces mais aussi réduire la diversité des écrans proposés. Si des épreuves de nature différentes (jugement, production) peuvent difficilement avoir le même cadre, en revanche, pour un même type d'épreuve (jugement ou production), mais dans des domaines d'application différents (mots-nombres, formes géométriques), nous pouvons utiliser le même fond sans autre inconvénient que de devoir y placer des caractères (mots-nombres) ou des graphiques (formes géométriques). C'est ainsi que nous avons développé une interface unique pour les épreuves de jugement (Figure IV.13) ainsi qu'une interface unique pour les épreuves de production (Figure IV.14).

Nous avons pu agir de la sorte pour des raisons extrêmement simples :

- quelle que soit l'épreuve, tous les items ont une taille compatible avec le support (deux à quatre éléments),
- en jugement, il suffit de dire si la suite présentée est en accord avec la consigne ou non (éventuellement "je ne sais pas"), et ce, que cette suite soit constituée de mots-nombres, de formes géométriques ou autres...,
- en production, il suffit de positionner les éléments des différents items présentés à la suite les uns des autres, selon un ou plusieurs critères (syntaxe et sémantique pour les mots-nombres, taille pour les formes géométriques).

Dans les lignes qui suivent, nous présentons de façon détaillée les deux écrans de base qui apparaissent dans les exercices proposés dans L.A.R.A. à leur actuelle.

IV.5.3.1 L'I.H.M. en jugement

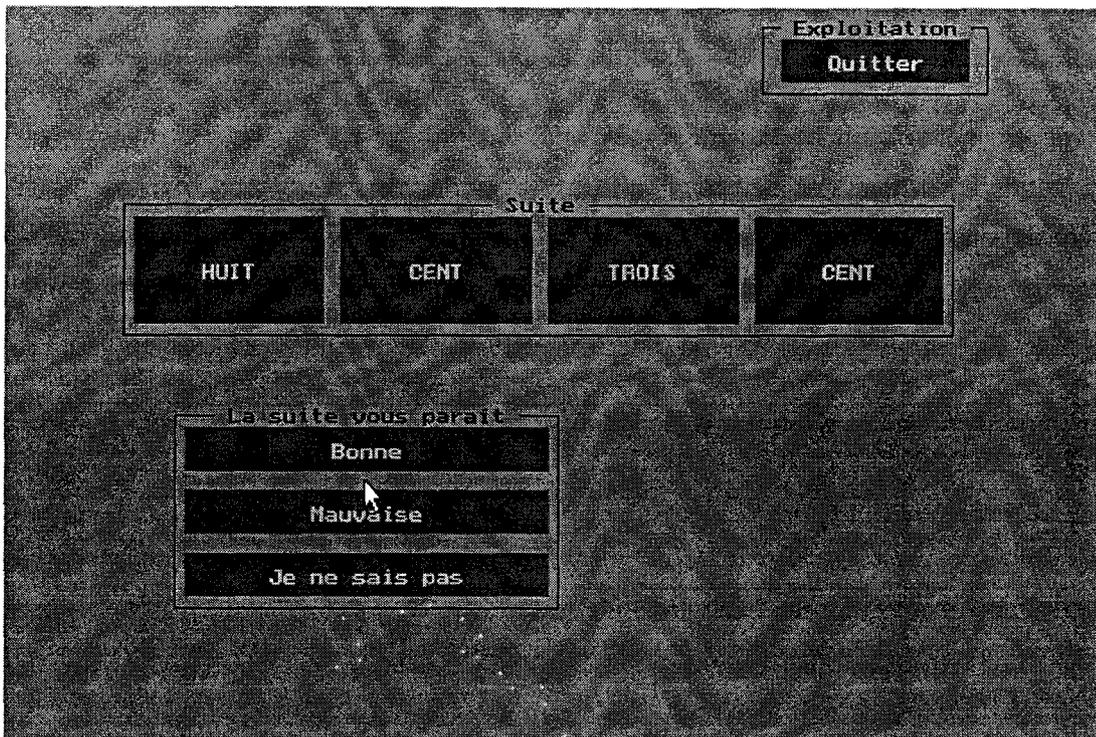


Figure IV.13 : Ecran principal en jugement, ici de mots-nombres.

Comme le montre la figure IV.13, l'écran en jugement comprend trois zones qui comportent chacune un titre explicite qui les encadre :

- *Suite*. Ce groupe de deux à quatre éléments placé au centre de l'écran comprend évidemment l'item auquel s'applique la consigne. A noter que pour une épreuve de choix (mot/non-mot), l'item peut ne contenir qu'un seul élément,
- *La suite vous paraît*. C'est dans cette zone qu'on attend la réponse du malade. A la présentation de l'item, le curseur de la souris est placé à égale distance des fenêtres "Bonne" et "Mauvaise". Cela permet de placer le patient dans des conditions identiques pour chaque item et de limiter l'influence de la réponse précédente ainsi que les "clics" faits par erreur dans la mesure où le malade doit d'abord effectuer un déplacement vers une des cases réponse avant qu'un "clic" ne puisse être pris en compte,
- *Exploitation*. Cette case permet au patient de quitter la session en cours ou plus généralement d'effectuer une pause. Pour cela, lorsque le malade sélectionne la case "quitter", on remplace cette zone "exploitation" à case unique par une autre qui elle comprend deux éléments : *quitter* (sortie définitive) et *reprendre* (pause) placés côte à côte horizontalement. Afin d'éviter un "clic" malencontreux qui ferait sortir définitivement le malade alors qu'il ne le souhaite pas, nous avons pris

soin de positionner l'option "reprendre" en lieu et place de la case "quitter" qui apparaissait auparavant, le malade ne peut donc que difficilement quitter l'exercice par accident.

L'interaction avec le malade est limitée en principe au *déplacement du curseur* de la souris vers l'une ou l'autre des case réponse ("bonne" ou "mauvaise") qui passe alors en inverse-vidéo et à la *validation par appui d'un bouton* de la souris. L'apprentissage de l'utilisation de cette interface s'avère donc relativement simple, tout comme l'est la compréhension de l'exercice.

IV.5.3.2 L'I.H.M. en production

La figure IV.14 nous présente l'écran de base en production. Cet écran comprend lui aussi trois zones :

- *Formes* ou *Nombres*, selon le type d'épreuve. Cette zone contient les éléments de l'item (deux à quatre) disposés verticalement à gauche de l'écran et dans un ordre tel que 0, 2, 3 ou 4 d'entre eux sont mal placés.
- *Réponse*. Cette zone contient autant de cases qu'il y a d'éléments dans l'item. Le malade doit y ranger sa réponse (voir ci-dessous, création de la réponse),
- *Exploitation*. Outre la case "quitter" que nous avons développée dans l'épreuve de jugement, la zone exploitation contient une case "validation" qui permet au malade d'indiquer au système qu'il est satisfait de sa réponse et que celle-ci peut être prise en compte ainsi qu'une case "recommencer" qui comme son nom l'indique permet au malade de recommencer une réponse s'il la juge incorrecte. Il se retrouve alors dans la situation de départ (item à gauche et zone réponse vierge) avec en plus la présentation de sa réponse fausse (cf. Fig. IV.4). En rééducation et après analyse de la réponse du malade, on ajoute même une quatrième case à cette fenêtre exploitation : "item suivant", la raison en est simple : dans la mesure où la réponse du malade a été jugée incorrecte et que le thérapeute ne souhaitait pas que le patient fournisse obligatoirement la bonne réponse, il fallait laisser le choix au malade de recommencer avec le même item ou de passer à l'item suivant.

Création de la réponse : L'interaction avec le malade est ici plus complexe qu'en jugement. On demande au patient de déplacer les éléments situés dans la fenêtre "Formes" ou "Nombres" vers la zone réponse. Cette procédure se décompose en six temps, à répéter pour chacun des éléments de l'item :

- choisir un des éléments de l'item (s'il reste plus d'un élément),
- placer le curseur de la souris dans la case contenant cet élément,

- "cliquer" pour indiquer au système qu'on sélectionne cet élément,
- choisir la case correspondant à la position de cet élément dans la réponse,
- déplacer le curseur de la souris vers cette case,
- "cliquer" pour indiquer que c'est dans cette case de la zone réponse qu'on désire placer l'élément de l'item.

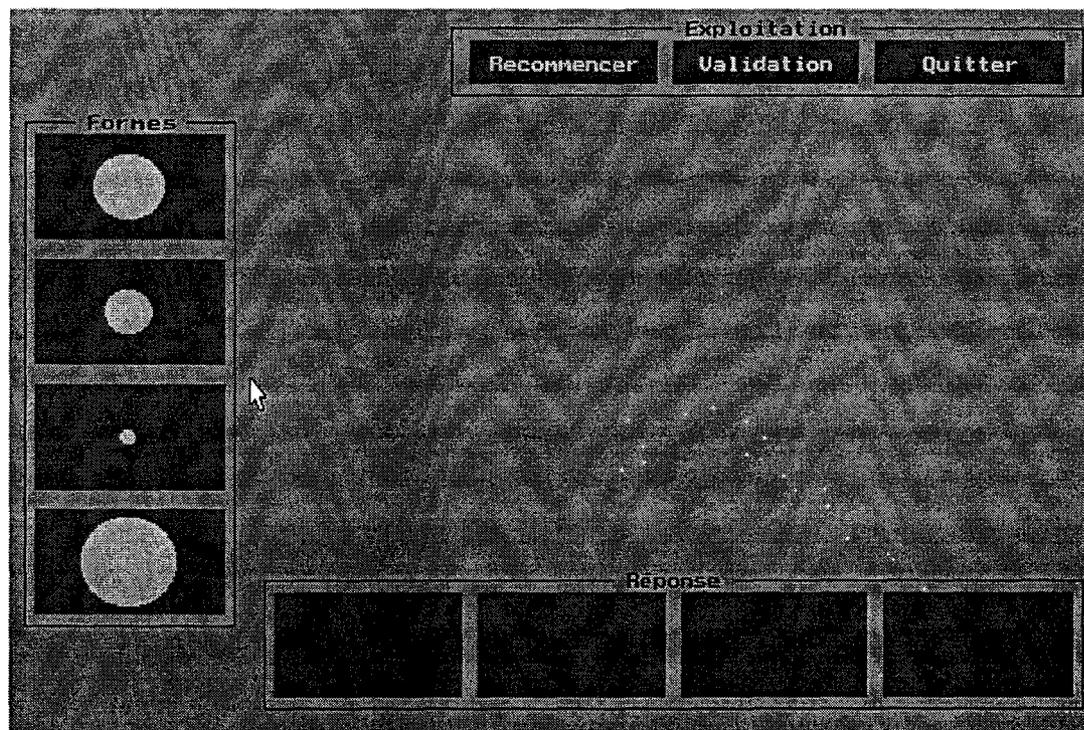


Figure IV.14 : Ecran principal en production, ici de suites de formes géométriques.

Facilitations apportées aux malades : Comme auparavant, à chaque fois que le curseur de la souris apparaît dans une case qui peut être sélectionnée par le malade, celle-ci passe en inverse-vidéo. Nous usons également de cet artifice s'il s'agit d'un élément de l'item que le malade saisit (phase n°3 ci-dessus) pour le déplacer en zone réponse. Cet item reste alors en inverse-vidéo, même si le curseur de la souris ne se trouve plus dans cette case, et ce jusqu'à ce qu'il "clique" dans une case réponse ou qu'il effectue n'importe quel autre choix (sélection d'un autre élément ou d'une case de la fenêtre exploitation). C'est ce dernier argument, la possibilité de choisir autre chose, qui nous a incité à ne pas déplacer l'élément de l'item sélectionné en même temps que le curseur de la souris mais tout simplement à le laisser en inverse-vidéo, afin donc, de n'avoir aucune influence sur la liberté d'action du malade.

Une restriction à cette liberté a toutefois lieu : les cases qui ne peuvent pas être sélectionnées ("validation" ou "recommencer" alors qu'il n'y a rien en zone réponse) ne passent pas en inverse-vidéo quand le curseur s'y trouve, alors qu'elles sont bien présentes à

l'écran. De cette manière, nous incitons le malade à se demander pourquoi ces cases à l'écran ne peuvent pas être sélectionnées, l'effet obtenu est donc positif pour le malade.

IV.5.4 Mise en oeuvre de l'I.H.M. de L.A.R.A.

IV.5.4.1 Présentation

Notre but ici n'est pas d'évoquer les modèles et méthodes de conception des interfaces homme-machine (pour une revue de détail critique, le lecteur pourra se référer à [COU 90, KOL 93, KOL 95]), mais d'explicitier l'architecture des I.H.M. de L.A.R.A..

L.A.R.A. est composé de deux structures bien différentes. D'une part nous avons une structure indépendante composée de menus, d'autre part nous avons une structure basée sur un système expert. Le fonctionnement de l'une et l'autre de ces interfaces est donc différent. Nous avons respectivement une interface développée exclusivement dans un langage procédural (Turbo-Pascal) et une interface commandée par des règles de production (Snark Open).

Il nous paraissait difficile d'envisager la conception de l'une, sans que les outils créés pour celle-ci ne puissent être utilisés dans l'autre. Snark Open permettait d'inclure des procédures Pascal dans ses règles de production, nous nous sommes donc naturellement tournés vers le langage pascal pour réaliser nos outils, voire même pour réaliser une application complète (menus).

IV.5.4.2 La boîte à outils

La boîte à outils que nous avons développée pour L.A.R.A. contient un ensemble de procédures et fonctions inhérentes principalement à :

- l'apparence et à la gestion de la souris dans un écran graphique mais aussi texte (résultats des malades),
- la gestion d'une carte vidéo E.G.A. en 16 couleurs,
- la création d'objets génériques de type "fenêtre" (coordonnées type rectangle et contenu de type texte ou graphique),
- la gestion mono-tâche d'une interface graphique à base de fenêtres,
- la manipulation de parties d'écran (sauvegarde en mémoire, déplacements, duplication),
- la compression et la décompression de fichiers image au format P.C.X. pour la réalisation et la récupération par L.A.R.A. de graphismes complexes (cartes de jeu, etc.),
- la manipulation de pages vidéo virtuelles, c'est-à-dire de même format que les deux pages graphiques E.G.A., mais situées en dehors de la mémoire R.A.M. vidéo,

- etc.

IV.5.4.3 La gestion des menus

IV.5.4.3.1 Contenu d'un menu

Les menus dont nous avons un aperçu figure IV.8 sont dans leur très grande majorité composés de trois parties (la figure IV.9 nous présente deux menus d'un type différent destinés à faire de la recherche de fiche) :

- un en-tête ("menu principal", "exercices", "nombres", etc.),
- un ensemble d'options en rapport avec l'en-tête ("choix d'un exercice", "exécution d'un exercice"). La sélection d'une de ces cases positionne un vecteur (type d'exercice, mode de déroulement, etc.) et lance le cas échéant le menu suivant, une application (résultats d'un malade), un écran récapitulatif (choix d'un exercice) ou enfin retourne au menu principal,
- une fenêtre de retour au menu immédiatement précédent ou à *un certain* menu précédent.

IV.5.4.3.2 Corps d'un menu

Le corps d'un menu est constitué d'une procédure au format standard représenté sous forme simplifiée figure IV.15. Comme indiqué, cette procédure comprend sept étapes. Les six premières établissent le contexte du menu. Cela va de la création dynamique des fenêtres et de leur affichage à la délimitation de la zone de déplacement de la souris en passant par la mise à jour du menu précédent. La dernière étape (n°7) est constituée d'une boucle destinée à réagir aux actions de l'utilisateur, elle se décompose en deux sous parties :

- on a tout d'abord en 7-A un balayage de la zone active de la souris fenêtre par fenêtre afin de positionner l'état de leur booléen respectif "DANS[Fenêtre n°i]" à "vrai" si le curseur de la souris se trouve dans la fenêtre et à "faux" sinon,
- on a ensuite en 7-B une succession de conditions qui activent le processus propre à chaque fenêtre, si bien sûr le curseur de la souris se trouve dans cette fenêtre et si en plus il y a appui sur un bouton de la souris (la vitesse de balayage de la boucle de l'étape 7 est suffisamment rapide pour qu'aucun clic souris ne soit perdu). Ce processus dépend évidemment de ce que l'on désire réaliser : succession de choix et donc de menus, pour la sélection d'un menu ou l'affichage d'une fiche de résultats, retour en arrière, lancement d'une application (session d'exercice ou d'affichage de résultats).

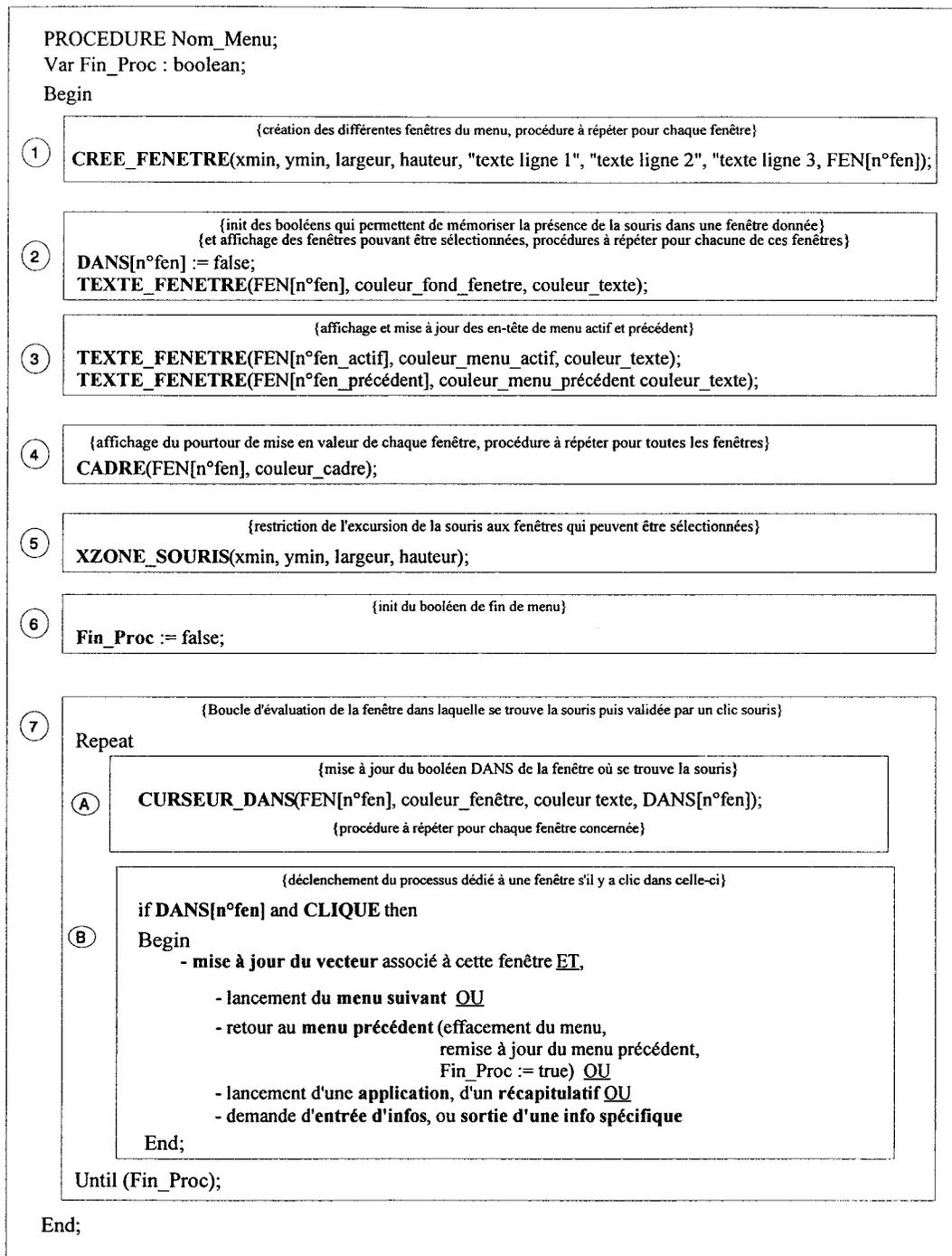


Figure IV.15 : Corps d'un menu.

IV.5.4.3.3 Gestion des menus

Chaque menu comprend une structure identique à celle présentée ci-dessus, donc facilement reproductible, et c'est dans la partie n°7 de ce corps de procédure qu'à lieu la gestion du menu. La tâche de fond est avant tout d'être aux ordres de l'utilisateur et de le faire principalement, progresser de menus en menus. Les liens entre les différents menus de l'interface thérapeute-machine se trouvent donc dans la partie 7-B. Ces liens sont à la fois

simples et complexes. Simples dans la mesure où pour chaque fenêtre on lance une nouvelle procédure menu dont le corps de programme est séparé de la précédente : par exemple, figure IV.8, le choix de l'option "choix d'un exercice" du menu principal, renvoie le programme vers la procédure "exercices" correspondant à ce nouveau menu, et complexes dans la mesure où procédures appelante et appelée sont liées par la mise à jour du contexte du menu appelant (couleurs d'en-tête, zone de déplacement de la souris).

La voie que nous avons suivie est la suivante : c'est la procédure fille qui est en charge de replacer le contexte de la procédure mère plutôt que l'inverse. Nous avons choisi cette voie afin de confier les rênes au dernier arrivé qui est en charge de placer le système dans l'état souhaité.

L'architecture des menus n'est pas une structure arborescente même si elle y ressemble très fortement (cf. Fig. IV.16). En effet, si le chemin A, B, D, E a un aspect classique comme en témoignent les différents arcs orientés de type 1 et 2 qui relient ces éléments, ce n'est pas le cas du chemin A, C, F, E puisque de F on se dirige vers une autre branche (arc 3).

Au niveau des retours, on assiste également à des "anomalies" puisqu'on peut court-circuiter des étapes (arcs 4 et 5), sans qu'il soit nécessaire de fermer manuellement les fenêtres intercalées (menus C et F).

Cette structure est donc un automate à états finis.

IV.5.4.3.4 Adaptabilité et maintenance

Telle que nous l'avons réalisée, l'interface thérapeute-machine est évolutive et permet l'ajout de nouveaux menus (cf. Option "Autres" du menu Exercices, figure IV.8). L'adoption d'une structure type de menu facilite d'ailleurs cette intégration.

Cependant, structure du système et traitement du contenu inhérent aux fenêtres sont imbriqués, ce qui pose des problèmes de lisibilité et de maintenance. Sans être catastrophique, cette approche est délicate lorsque l'on se trouve dans une situation où les liens sont de type 3, 4 ou 5 (figure IV.16), c'est à dire où on ne retourne pas directement au menu appelant et où on change de branche.

IV.5.4.3.5 Perspectives

Sans être une nécessité dans notre cas, nous pensons qu'il serait intéressant de différencier l'automate qui modélise le cheminement dans les menus des traitements associés aux fenêtres qui sont deux choses totalement distinctes. On aurait ainsi d'un côté la programmation d'un ou plusieurs graphes, ce qui permettrait de gérer plusieurs tâches simultanément (au niveau des interfaces entendons nous bien) et de l'autre des concepts objets

propres à la représentation graphique des menus ainsi que les variables liées aux différentes fenêtres ou le lancement d'applications (tuteurs, exploitation des résultats).

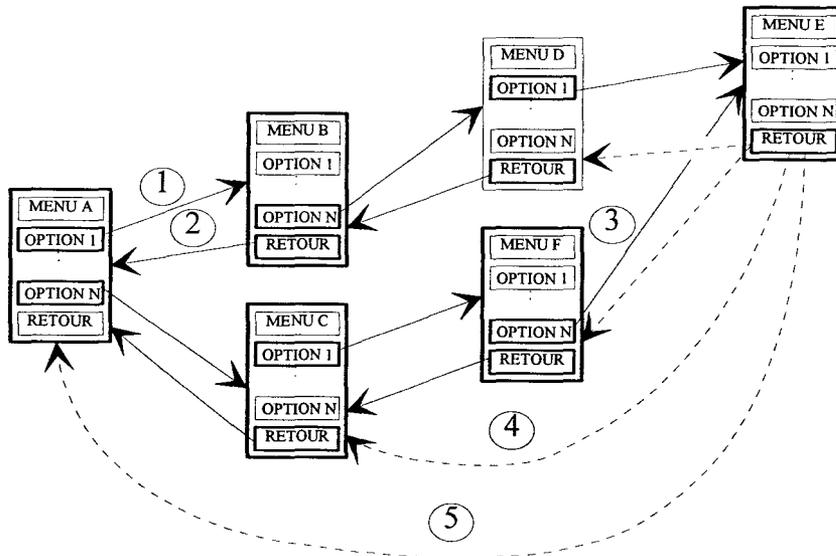


Figure IV.16 : Cheminement dans les menus

IV.5.4.4 Les tuteurs : une gestion de l'I.H.M. par règles de production

Les diverses procédures et fonctions développées dans la boîte à outil nous ont également permis de réaliser les interfaces utilisateur des tuteurs de jugement et de production (il existe également une maquette utilisant des représentations de cartes de jeu).

La différence entre ces interfaces et la gestion des menus se situe au niveau du système de gestion. Dans le cas présent l'évolution de l'écran se fait soit par l'intermédiaire du déclenchement d'une règle de production du tuteur, comme par exemple celle présentée figure IV.17. Ces règles font qui font appel à des procédures en Turbo-Pascal permettent d'afficher les informations nécessaires au malade pour traiter l'item choisi par le système expert et qui sont capables de gérer cet écran indépendamment du système expert (déplacement souris, passage en inverse-vidéo de la case dans laquelle se trouve le curseur, "clic" souris) et de lui renvoyer les informations utiles (réponse du malade).

La règle présentée figure IV.17 est celle qui nous permet depuis le tuteur de formes géométriques élaboré sous Snark Open :

- d'afficher l'item à l'écran (procédure XENVOI_ITEM_FORMES) en passant en paramètres d'entrée de cette procédure, les éléments de l'item (variables "un", "deux", "trois" et "quatre") conformément à la figure IV.13,

- d'attendre la réponse du patient en gérant le fonctionnement de l'interface (procédure XREPONSE_RECON) qui renvoie sa réponse au système expert (paramètre "rep" en sortie) afin qu'elle soit analysée.

```

REGLE : REP_PAT_JUGEMENT_FORMES

  APRES  EST TYPE_EXO = (type)
         (type) = RECONNAISSANCE
         VALEUR1  ITEM = (un)
         VALEUR2  ITEM = (deux)
         VALEUR3  ITEM = (trois)
         VALEUR4  ITEM = (quatre)
         PROPOSITION ITEM = (valid)
         NOMBRE   ITEM = (ni)
         (ni) <= VAUT NBRE_ITEM_MAX
         ITEM LANCEMENT = EN_ATTENTE
  ALORS
         ENTREE (un) (deux) (trois) (quatre)
         APPEL XENVOI_ITEM_FORMES

         APPEL XREPONSE_RECON
         SORTIE (rep)

         VALEUR REPONSE <-- (rep)
         TUERFAITS ITEM LANCEMENT
FR

```

Figure IV.17 : Exécution d'une procédure d'affichage et de saisie par règle de production

IV.6 Domaines d'application actuellement mis en oeuvre

IV.6.1 Introduction

L.A.R.A. a pour objectif d'étudier les capacités de patients aphasiques à porter un jugement et à produire une réponse. A l'heure actuelle, deux domaines d'application nous ont permis d'élaborer des épreuves de ce type : l'un fait appel à des suites de formes géométriques et a été développée en collaboration avec Mr. G. Deloche (Pitié-Salpêtrière) et l'autre, développé en collaboration avec le Dr. O. Godefroy (C.H.R. de Lille) fait appel à des suites de mots-nombres. Dans leur forme, ces deux épreuves sont semblables, elles utilisent d'ailleurs les mêmes interfaces utilisateur (voir ci-dessus). Dans le fond, l'une est une épreuve où seule la taille, le nombre, la forme des éléments ainsi que l'allure de la suite interviennent (formes géométriques) alors que la seconde est beaucoup plus complexe est fait intervenir des règles linguistiques (syntaxe et sémantique).

Dans les lignes qui vont suivre, nous présenterons les protocoles mis en oeuvre lors de ces différentes épreuves sans revenir sur leur présentation qui a déjà été faite de façon générale (cf. IV.5.3).

IV.6.2 Jugement et production de suites de formes géométriques

IV.6.2.1 Présentation

L'utilisation de suites de formes géométriques était pour nous l'occasion de vérifier que les patients étaient capables de répondre à des consignes aussi simples que : "la suite vous paraît-elle croissante de gauche à droite ?" ou "ordonnez les éléments qui vous sont présentés pour former une suite croissante". C'était aussi l'occasion d'utiliser des protocoles simples afin de vérifier que si les interfaces utilisateur posaient problème au malade, ces difficultés étaient dues uniquement à la manipulation de l'interface plutôt qu'à l'utilisation erronée de règles logiques, et ceci dans le but de valider les choix établis dans la réalisation de notre outil d'évaluation. Nous proposons d'ailleurs à cette occasion un entraînement de quelques items au malade (ceci vaut également pour les épreuves à bases de mots-nombres) afin de vérifier que la consigne était parfaitement assimilée.

Si le nombre d'items varie selon que l'épreuve consiste en une évaluation en jugement (42 items) ou en production (50 items), les items comportent tous de deux à quatre éléments. La longueur des items est susceptible d'avoir une influence sur les performances des malades, d'autres paramètres comme la différence de taille, le type de forme utilisée ou même l'allure générale de la suite présentée, peuvent aussi y jouer un rôle.

IV.6.2.2 Jugement de suites

Les 42 items proposés en jugement sont équitablement répartis entre items corrects et items incorrects. Ils sont prédisposés aléatoirement une fois pour toutes afin que les conditions soient identiques d'un malade à l'autre et comprennent pour chacune des listes (correctes et incorrectes) : 7 items de deux formes, 7 de trois et 7 de quatre formes.

La figure IV.18 nous présente les types de formes qui ont été retenues pour réaliser les différents items. Une seule forme est employée par item, et cinq tailles de symboles ont été définies, ce qui nous permet la possibilité d'avoir des contrastes plus ou moins prononcés au niveau de l'allure de la suite.

Parmi les six allures de suite possibles, seule les quatre premières ont été retenues en test. Chaque suite comporte donc au maximum deux pentes opposées (+ et -), du moins en ce qui concerne les suites ne répondant pas à la consigne (suite croissante de gauche à droite).

En fonction du nombre d'éléments que comporte la suite et de leurs tailles (suites de type 1 et 2), il nous est possible de déterminer si les patients sont sensibles à la longueur des items et si la pente de la suite influe sur la nature de leur réponse.

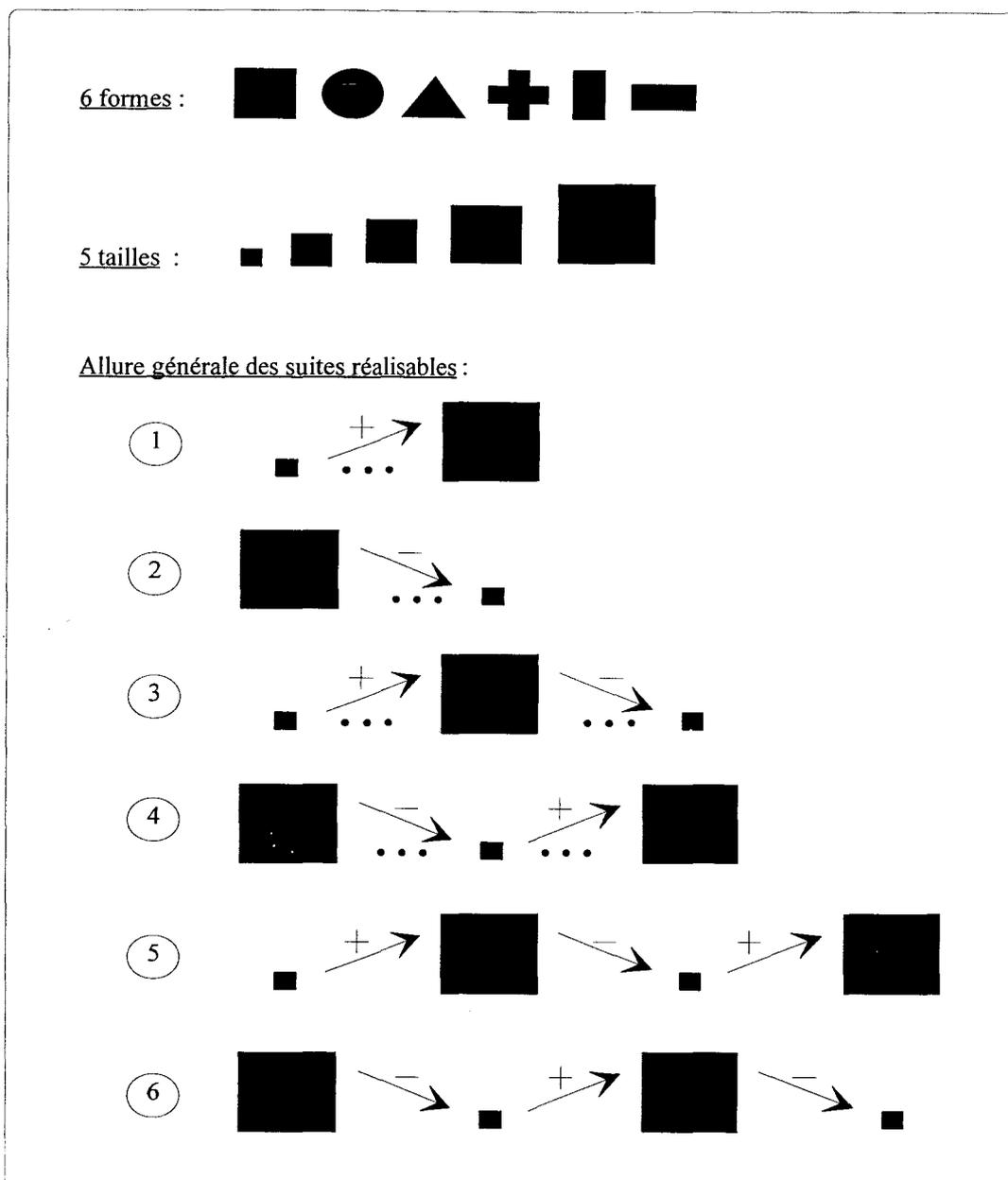


Figure IV.18 : Formes géométriques et suites utilisées en jugement de suites.

De même, il nous a été possible de renforcer l'une ou l'autre de ces pentes (suites de type 3 et 4) : pentes positives ou négatives plus ou moins douces ou fortes, dominance en longueur de la pente positive ou de la pente négative. Cela permet de réaliser des trompes l'oeil lorsque le nombre d'éléments est élevé. On peut ainsi réaliser des suites à quatre éléments de type 3 ou 4 avec une pente "+" (trois éléments) plus longue est plus forte que la pente "-" (un élément), et démarrant ou terminant la suite (cf. Fig. IV.19). Nous pouvons ainsi détecter des erreurs de diagnostic montrant que le patient est influencé par le début ou par la fin de la suite et non pas par sa totalité.

Enfin, la nature de la réponse précédente (ou d'une séquence de réponses précédentes), et donc l'organisation de la batterie pouvait également influencer la performance.

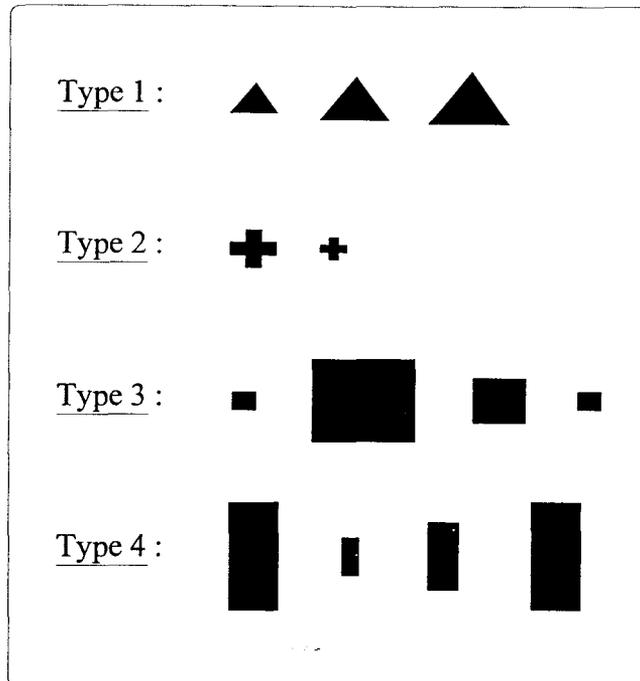


Figure IV.19 : Exemples de suites rencontrées.

IV.6.2.3 Production de suites

Les 50 items proposés en production ont les mêmes caractéristiques que ceux utilisés en jugement. Chacun d'eux permet de réaliser une suite strictement croissante, il n'y donc pas d'ambiguïté quant à l'organisation de la suite. Conformément à la figure IV.14, ceux-ci sont présentés à gauche de l'écran avec leurs éléments les uns en dessous des autres et la disposition de ces éléments est telle qu'il y a soit aucun, soit deux, trois ou quatre d'entre eux qui sont mal placés.

IV.6.3 Jugement et production de mots-nombres

IV.6.3.1 Présentation

Sous l'égide de Gérard Deloche et de Xavier Seron (cf. Chapitre III), le traitement des nombres a fait l'objet de nombreux travaux en matière de transcodage du code alphabétique vers le code numérique (et inversement) et de jugement de grammaticalité de suites de mots-nombres [DEL 86]. Ces travaux ont permis de mettre des méthodes de rééducation en application [DEL 87a, TER 87, FER 90].

Dans L.A.R.A., le nombre n'apparaît que sous sa forme alphabétique : le mot-nombre. Un mot-nombre est une suite organisée d'éléments issus du lexique alphabétique des nombres (ex : un, deux...neuf, dix, cent, etc.). Organisée signifie qu'il faut observer un certain nombre de règles syntaxiques (cf. III.3.4.2.3) pour produire des mots-nombres corrects. A l'inverse,

ces règles permettent de juger de l'état correct ou non de la grammaticalité d'expressions de ce type.

Les épreuves de traitement de mots-nombres que nous allons détailler ci-après sont à la base du système L.A.R.A. [VANN 92]. La première permet de vérifier que les malades ont toujours accès au lexique des mots-nombres, la deuxième de vérifier qu'ils sont capables de juger de l'état correct ou non de mots-nombres et la troisième de vérifier qu'ils sont capables de produire des mots-nombres. Ces épreuves sont des pré-tests qui ont pour but d'évaluer les compétences des malades au niveau lexical, syntaxique et sémantique.

IV.6.3.2 Jugement mot-nombre / non mot-nombre

Vérifier que les malades ont toujours accès au lexique des mots-nombres est l'étape initiale de notre programme d'évaluation.

Pour évaluer la préservation du lexique chez les malades, une épreuve de jugement mot-nombre/non mot-nombre leur est proposée. Cette épreuve comprend 23 mots issus du lexique des mots-nombres mélangés à 23 mots d'une ou de deux syllabes, d'usage fréquent dans la langue, et désignant des objets (table, bouteille, etc.) ou des animaux (chat, chien, etc.).

C'est à partir de l'interface malade-machine employée dans les différentes épreuves de jugement, adaptée en conséquence (on présente un item à un seul élément et non pas une suite de deux à quatre éléments), que nous réalisons ce test.

IV.6.3.3 Jugement de suites de mots-nombres

L'épreuve de jugement de suites de mots-nombres consiste à dire si la suite présente à l'écran est relative à un nombre existant, donc si elle est syntaxiquement correcte, ou si elle ne correspond pas à un nombre. Les items utilisés lors de cette épreuve de jugement grammatical sont au nombre de 132 et ont été utilisés par G. Deloche et X. Seron dans une épreuve de même type [DEL 86]. Ces items comportent de deux à quatre mots et représentent tous des quantités inférieures à mille. Parmi les expressions correctes, on trouve par exemple "DIX SEPT", "HUIT CENT QUINZE" ou "DEUX CENT CINQUANTE NEUF", alors que parmi les expressions incorrectes on trouve entre autres "UN CENT", synonyme de généralisation de la règle syntaxique *Unité-CENT*, "QUATRE VINGT CINQUANTE" (cf. V.3.4.2.3, règle de rejet n°25), ou encore "CENT NEUF ZERO CINQ".

IV.6.3.4 Production de suites de mots-nombres

En production de mots-nombres il est demandé au patient de réorganiser un ensemble de deux à quatre mots-nombres de base afin de réaliser non seulement un mot-nombre syntaxiquement correct, mais qui corresponde en plus à la quantité la plus grande réalisable avec cet ensemble. Par exemple, avec les mots "VINGT" et "QUATRE", il est possible de réaliser "VINGT QUATRE" qui représente une relation additive ($20 + 4$), mais aussi "QUATRE VINGT" qui représente une relation multiplicative ($4*20$) correspondant à une quantité plus grande.

Plus généralement (à partir de trois mots), les mots-nombres réalisables forment des expressions symbolisant une combinaison de ces deux opérations.

105 items sont proposés aux malades et permettent de réaliser des expressions de deux, trois ou quatre mots. Ils sont distribués d'une façon équiprobable en fonction du nombre de mots mal placés qui les composent.

Par rapport à l'épreuve de jugement, la présentation de l'item (verticalement et à gauche de l'écran comme le montre la figure IV.14) peut jouer un rôle important dans la performance du malade. La lecture verticale de ces mots peut l'induire en erreur si elle correspond à une expression syntaxiquement correcte, sans représenter l'expression correspondant à la quantité la plus grande : "HUIT CENT VINGT QUATRE". La présentation peut aussi lui faciliter la tâche si cette expression ne comporte pas de mots mal placés : "HUIT CENT QUARANTE SIX".

IV.7 Conclusion

L.A.R.A. est un système ouvert qui permet grâce à sa structure évolutive d'intégrer de nouvelles épreuves. Actuellement, nous avons concentré notre effort sur le dialogue avec le thérapeute et avec le malade.

Le dialogue avec le thérapeute est constitué d'un environnement qui permet à celui-ci de choisir les exercices qu'il désire donner à ses patients en les adaptant par l'intermédiaire de l'acceptation ou non d'options, et de consulter directement les résultats des malades dans le même environnement. Pour l'exploitation analytique des performances, il a été prévu de convertir le fichier résultat de chaque session effectuée par un malade dans un format reconnaissable par Microsoft Excel.

Le dialogue avec l'apprenant est une des quatre composantes importantes d'un tuteur intelligent (expert du domaine, pédagogue, modèle de l'apprenant et I.H.M., cf. Annexe C). Des travaux se sont déjà concentrés sur la modélisation du malade, nous ne sommes pas revenus sur ce sujet, pas plus que nous n'avons tenté de faire une évaluation qualitative des productions des malades par l'intermédiaire d'une base de stimuli dynamique. Aujourd'hui donc, le module pédagogique de L.A.R.A. n'a pas encore été développé. Nous n'avons pas voulu reprendre les épreuves développées par G. Deloche et X. Seron. Les méthodes ainsi que les hypothèses avancées ne nous appartiennent pas et ne seront pas abordées.

Donc, nous avons décidé pour notre part d'évaluer l'aptitude des patients cérébro-lésés à utiliser un système informatisé d'évaluation qui fait appel à un moyen de communication aujourd'hui très répandu (la souris) mais dont le bon usage par les patients n'était pas garanti.

L'étude de faisabilité que nous allons découvrir lors du prochain chapitre nous a permis d'évaluer le comportement des malades d'abord vis-à-vis de la souris, puis dans le contexte de L.A.R.A., c'est-à-dire face aux interfaces de communication de ce système.

Comme ce contexte utilise des épreuves susceptibles de poser des problèmes aux malades (jugement et production de suites de formes géométriques et de mots-nombres), nous y présentons également les résultats observés à ce sujet, mais sans tenter de les interpréter sous un angle neuropsychologique.

Chapitre V

EVALUATION DE L'APTITUDE DES MALADES A UTILISER LE SYSTEME L.A.R.A.

V.1 Présentation

L'étude que nous avons réalisée visait à apprécier l'acceptabilité et la faisabilité d'un outil d'évaluation de patients cérébro-lésés tel que L.A.R.A. et tout particulièrement à apprécier le dialogue malade-machine que nous avons favorisé dans le système L.A.R.A. qui privilégiait l'emploi de la souris. Notre étude consista donc à s'assurer que ce mode de communication était utilisable par des patients qui présentent souvent des déficits sensori-moteurs.

Cette étude présente les résultats préliminaires observés sur une population limitée de patients cérébro-lésés qui ont été présélectionnés dans ce but et se décompose en deux parties. La première est destinée à présenter la souris à ces sujets qui n'en connaissent pas l'usage et à évaluer leur comportement dans des tâches simples : déplacement vers une cible à l'aide de mouvements suivant un axe (horizontal, vertical) ou deux axes (en diagonale), sélection par appui d'un bouton. La deuxième partie de l'étude est destinée à s'assurer que les deux interfaces malade-machine (jugement et production) sont utilisables par les malades (mode de dialogue, disposition et pertinence de l'information, etc.). Les problèmes rencontrés ainsi que les performances sont rapportés pour chacune des épreuves utilisées.

V.2 Population d'étude

Treize patients admis dans le Service Neurologie B du C.H.R. de Lille durant les quatre premiers mois de l'année 1995 ont été sélectionnés par le Docteur O. Godefroy selon les critères suivants : âge de vingt à soixante ans, présence d'une lésion cérébrale focale aiguë et capacité à réaliser des tests sur micro-ordinateur. Quatre patients furent exclus pour les raisons suivantes : démence, déficit sensoriel, aphasie ou héminégligence sévère, troubles psychiatriques, affections cardiaques, respiratoires ou rénales sévères, alcoolisme, illettrisme.

L'examen neurologique des neuf patients restants révéla que :

- ces patients avaient une latéralité manuelle droite et qu'un malade avait déjà utilisé un ordinateur.

- quatre patients présentaient des troubles moteurs (trois du côté droit et un du côté gauche) associés à des troubles sensitifs pour deux d'entre eux (un du côté droit et un du côté gauche). Une ataxie (trouble de la coordination du mouvement volontaire) du membre supérieur gauche était présente chez deux patients,
- les lésions cérébrales étaient localisées dans la zone temporo-pariétale pour quatre patients (trois du côté droit et un du côté gauche), dans la zone frontale pour trois patients (deux du côté droit et un du côté gauche), dans les régions sous corticales (capsule interne pour un malade et centre ovale pour deux malades) et dans le cervelet pour deux patients.

Le groupe des témoins était composé de six sujets indemnes d'affection neurologique ou psychiatrique. Cinq étaient droitiers et un ambidextre et ce dernier effectua les épreuves de la main gauche. Cinq d'entre eux n'étaient pas utilisateurs usuels d'ordinateur.

Table 1 : Données démographiques et résultats de l'évaluation neuropsychologique générale.
D'après [VANN 95].

	PATIENTS	TEMOINS	P
n=	9	6	
AGE	51 (39-60)	41,5 (22-64)	0.47
EDUCATION	2 (1-3)	2,5 (1-3)	0.2
SEXE (H/F)	7/2	2/4	0.13
TOKEN TEST ABREGE	35 (33-35)	>29	
TRANSCODAGE DE NOMBRES			
A	12 (12-12)	12 (12-12)	
B	11 (9-12)	10 (10-12)	
C	12 (11-12)	12 (12-12)	
D	12 (11-12)	10 (10-11)	
E	12 (11-12)	12 (12-12)	
F	12 (11-12)	12 (12-12)	
G	12 (9-12)	10 (10-10)	
COMPARAISON DE NOMBRES			
A	16 (14-16)	16 (16-16)	
B	16 (14-16)	12 (12-14)	

Médiane (min, max), âge (années), niveau d'éducation (1, indique moins de 9 années de scolarité; 2, de 9 à 11 années; et 3, 12 années et plus avec baccalauréat); performance à la version abrégée du Token test; transcodings et comparaisons de nombres à l'aide de la batterie EC 301 (T.N. : A (répétition), B (chiffres vers mots-nombres), C (lecture orale de chiffres), D (dictée de mots-nombres), E (lecture orale de mots-nombres), F (dictée de chiffres), G (mots-nombres vers digits); C.N. : A (chiffres), B (mots-nombres)); H : homme, F: femme et P valeurs du test Fisher's exact (sexe) et du test Mann Whitney (autres).

Les patients et les témoins ne différaient pas significativement en âge et en niveau socio-éducatif (table 1),

Le patient atteint de graves troubles moteurs du membre supérieur droit utilisa sa main gauche pour réaliser les tests.

L'examen neuropsychologique général réalisé par M^{lle} Debachy, orthophoniste, comportait notamment :

- l'évaluation de la compréhension orale des patients par la version abrégée du Token Test [De REN 78],
- en cas d'aphasie, un examen par la Batterie Boston Diagnostic Aphasia Examination [GOO 72],
- le test de barrage d'Albert [ALB 73],
- l'évaluation de leurs aptitudes à traiter les nombres par l'intermédiaire de la batterie standardisée EC 301 (transcodages et comparaisons de nombres) [EC 301].

Aucun des patients ne présentait de trouble de la compréhension orale et écrite, ni d'apraxie gestuelle, ni d'héminégligence visuo-spatiale. Les résultats observés en traitement des nombres étaient dans la norme sauf pour deux patients : pour les sous-tests B et G de transcodage chez un patient et pour le même sous-test G chez un autre patient (table 1).

V.3 Matériel informatique utilisé

Un compatible I.B.M. P.C. "Zénith Data Systems" de type 286 et portable, muni d'un écran E.G.A. couleur et d'une souris Logitech à deux boutons a été utilisé dans les différents tests qui ont été réalisés par les patients et les témoins.

L'utilisation d'un matériel à processeur Intel 80286 était suffisante et n'avait pas d'influence mesurable sur la performance des malades. Le fait qu'il était portable fut un atout pour l'utiliser conjointement à l'hôpital avec les patients et au domicile des témoins.

La souris que nous avons employée était de forme rectangulaire et ses deux boutons rectangulaires eux aussi étaient d'une couleur qui les mettaient bien en évidence. Ceci permettait aux sujets qui n'avaient jamais utilisé de souris de les repérer facilement. D'une manière générale, l'ergonomie et l'excellente fiabilité de la souris (précision de déplacement et "clics" francs) nous ont semblé faciliter l'utilisation de cet outil.

V.4 Outils statistiques

Les résultats individuels étaient directement obtenus par l'intermédiaire du module d'exploitation des résultats de L.A.R.A..

L'analyse statistique des résultats a été effectuée à l'aide du logiciel S.A.S. [SAS 90]. Elle reposait sur des analyses de variance répétée (ANOVA) avec le facteur groupe (patient,

témoin) comme facteur inter-sujet et les conditions expérimentales comme facteur intra-sujet. Les analyses subséquentes furent réalisées par des analyses de contraste [GLAN 90].

V.5 Evaluation de l'aptitude à utiliser la souris

V.5.1 Introduction

Les applications informatiques actuelles font de plus en plus souvent appel à la souris dans le dialogue entre l'homme et la machine. C'est un outil qui permet une interactivité bien plus efficace que le clavier (bien que l'utilisateur averti peut préférer l'emploi des touches de raccourci), puisqu'on a un pointage direct de l'information souvent représentée par un message bref et explicite ou par un idéogramme (icône). Cette efficacité est observée après un apprentissage (fonctionnement, orientation de la souris, sensibilité de déplacement) pour les personnes étrangères à l'utilisation de techniques informatiques aussi bien que pour les personnes habituées à un autre mode de communication (clavier).

L'étude que nous avons menée a visé à évaluer les aptitudes de patients cérébro-lésés à utiliser ce périphérique de communication. Le but était de s'assurer que ce mode de dialogue nous permettait de concevoir une interaction homme-machine de ce type via une interface utilisateur graphique dans un programme informatisé d'évaluation et de rééducation.

V.5.2 Protocole

Le protocole permettait une présentation progressive de l'outil :

- présentation graphique de la souris,
- correspondance entre les mouvements du graphique et les mouvements de l'objet réel,
- présentation et rôle des boutons poussoirs,
- remplacement du graphique par un curseur (croix) plus conforme à la réalité.

Trois épreuves étaient utilisées. Elles avaient pour but d'évaluer les capacités des malades à effectuer des déplacements de base (horizontaux, verticaux et diagonaux) accompagnés ou non d'une validation ("clic" souris) :

- A) déplacer la représentation graphique de la souris et l'inscrire dans un rectangle situé dans l'un des coins de l'écran (cf. Fig. V.1),
- B) utilisation des mêmes stimuli que pour A , mais il fallait en plus valider d'un "clic" lorsque le graphique était situé dans le rectangle cible,
- C) idem que B (déplacement + clic) avec un curseur représentant une croix.

Chacune de ces trois épreuves comportait 17 stimuli dont le premier (fig. V.1) ne fut pas comptabilisé dans l'évaluation. Ces stimuli étaient répartis selon un parcours composé de :

- 6 déplacements horizontaux (3 vers la gauche et 3 vers la droite),
- 6 déplacements verticaux (3 vers le haut et 3 vers le bas),
- 5 déplacements en diagonale (les deux diagonales dans chaque sens plus l'item de départ).

V.5.3 Index de difficulté

Pour les épreuves A et B, les dimensions de l'icône et de la fenêtre cible étaient telles que la surface de l'icône représentait 50% de la surface de la cible. Pour l'épreuve C ce taux était de 34%.

Il paraissait donc plus facile d'atteindre la cible lors de l'épreuve C que dans les autres cas. Cette constatation est particulièrement vraie en ce qui concerne l'épreuve B. L'acceptation de la réponse y dépendait du bon positionnement du graphique dans le rectangle, sinon l'appui sur un bouton de la souris n'était pas pris en compte.

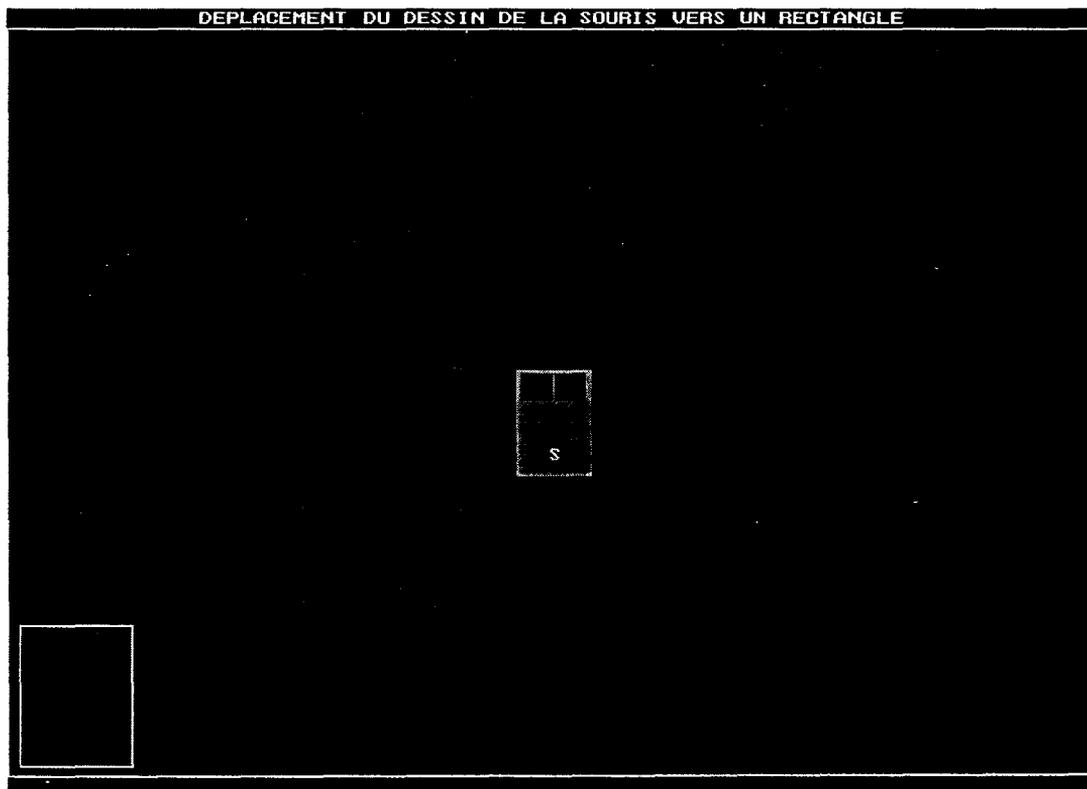


Figure V.1 : Déplacement de l'icône vers une cible rectangulaire.

V.5.4 Résultats

V.5.4.1 Analyse descriptive

Tous les patients ont été en mesure de réaliser les trois épreuves (A, B, C). Il n'a pas été constaté de problèmes d'utilisation liés à une hémignégligence visuo-spatiale qui auraient conduit les malades à négliger les stimuli disposés d'un côté ou de l'autre de l'écran. Le but n'était pas toujours atteint facilement et ceci semblait dépendre de l'intensité des troubles moteurs.

Les mouvements en diagonale étaient les plus difficiles à réaliser. Bien souvent, ce déplacement se décomposait en deux mouvements distincts : l'un horizontal et l'autre vertical. Ces deux mouvements étaient généralement exécutés dans cet ordre. Profitant du fait que l'icône de la souris restait confiné à l'intérieur de la fenêtre de fond, les patients effectuaient ces deux déplacements rapidement, c'est-à-dire qu'ils déplaçaient l'icône en butée horizontalement puis verticalement. Ensuite, par un mouvement plus lent ils ramenaient l'icône vers la fenêtre cible (cf. fig. V.2) placée légèrement en retrait du coin comme le montre la figure V.1. Ce geste était simple à réaliser pour les témoins, ce qui ne fut pas le cas pour certains patients et notamment pour ceux dont le trouble moteur était sévère. Atteindre la cible se faisait à tâtons et les mouvements peu précis observés trouvaient peut-être leur explication dans la grande sensibilité de déplacement que nous avons adoptée (1 cm de déplacement de la souris équivaut à 5 cm de déplacement du curseur, soit à 3°30' d'angle visuel).

Cette observation était également valable pour les déplacements simples (horizontal ou vertical) : déplacement rapide pour amener la souris en butée dans le coin opposé puis retour en arrière. Nous avons même observé un patient qui réalisait ce retour vers la cible par un déplacement oscillatoire du type "deux pas en avant et un pas en arrière".

Avec le temps, les sujets arrivaient à modifier leurs mouvements afin que le déplacement horizontal devienne une pente de plus en plus prononcée, voire une courbe (figure V.2).

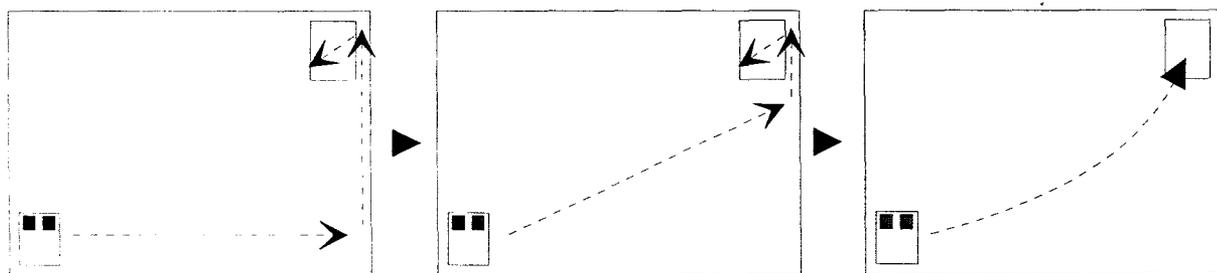


Figure V.2 : Evolution du mouvement diagonal.

Cette tendance à décomposer le mouvement diagonal s'estompait plus rapidement chez les témoins que chez les malades tout comme le besoin de rechercher visuellement les boutons de la souris (au détriment de déplacements parasites de l'icône). Ce comportement fut également un facteur de ralentissement puisque les malades avaient à faire un aller retour visuel entre l'écran et la souris.

Des indications concernant le rôle de la boule située dans la souris et la possibilité de déplacer la souris en l'air sans que cela n'affecte la position de l'icône à l'écran étaient fournies en début de séance. Cette particularité fut expérimentée par tous les sujets et malgré cela, les patients et uniquement eux oublièrent régulièrement d'effectuer ce geste alors que l'utilisation de la souris devenait inconfortable (bras tendu ou trop plié) voire impossible (boule de la souris ne reposant plus sur la table).

Nous observâmes même des cas où les malades tentaient d'effectuer un déplacement de l'icône alors que la souris était légèrement surélevée, et ne reposait donc pas parfaitement sur la table.

V.5.4.2 Analyse statistique

Les temps de déplacement et les pourcentages de réussite ont été analysés à l'aide de deux ANOVAs à quatre facteurs : sujet (patient, témoin), condition (épreuve A, B, C), déplacement horizontal (aucun, droite, gauche) et déplacement vertical (aucun, bas, haut). La variable dépendante était la transformée logarithmique du temps de réponse. Le temps de réponse correspondait au délai entre la présentation de l'item et la réponse du patient.

V.5.4.2.1 Performances globales

Les temps de déplacement (A) ou de déplacement et de validation par appui d'un bouton (B et C) étaient significativement plus longs chez les patients que chez les témoins ($df : 1 ; F : 73.95 ; P = 0.0001$) et variaient en fonction de l'épreuve ($df : 2 ; F : 6.62 ; P = 0.001$). L'analyse subséquente montra que les temps de réponse lors du test B étaient plus importants chez les patients que chez les témoins ($P = 0.05$) (cf. table 2 et Fig. V.3).

V.5.4.2.2 Déplacements suivant un axe

Les déplacements horizontaux et verticaux à l'écran étaient respectivement de 23 et 13 cm.

Nous n'avons pas constaté de différence significative dans le sens de déplacement (droite/gauche, haut/bas), tant pour les mouvements horizontaux ($df : 2 ; F : 0.94 ; P = 0.4$)

que pour les mouvements verticaux ($df : 2 ; F : 0.69 ; P = 0.5$). Mais, à l'image des résultats constatés pour les temps de réponses globaux, on observe une différence entre patients et témoins quel que soit le type de déplacement (cf. Fig. V.4), les patients étant plus lents que les témoins.

D'autre part, les interactions suivantes n'étaient pas significatives :

- sujet*déplacement horizontal : $P = 0.6$,
- sujet*déplacement vertical : $P = 0.9$,
- condition*déplacement_horizontal*déplacement_vertical : $P = 0.99$,
- sujet*condition*déplacement_horizontal*déplacement_vertical : $P = 1$.

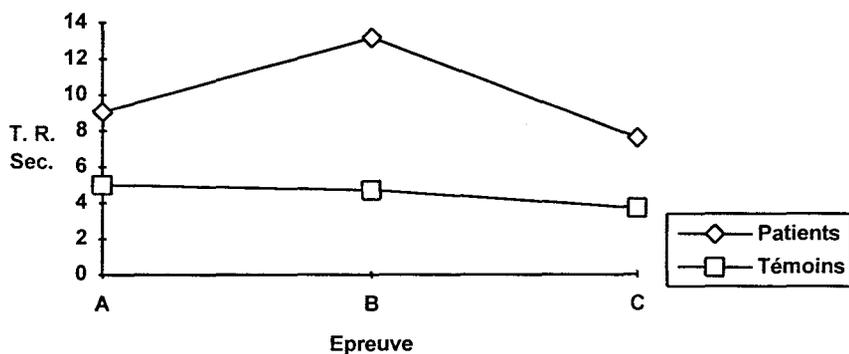


Figure V.3 : Temps de réponse moyen (T. R.) pour chaque épreuve.

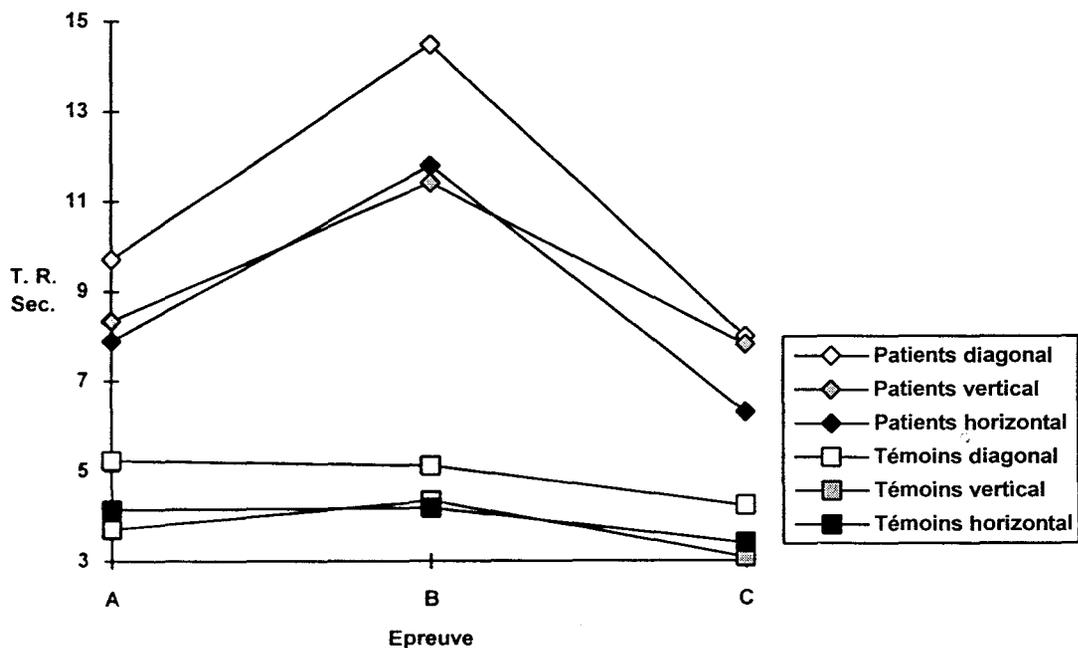


Figure V.4 : Temps de réponse moyen (T. R.) pour les différentes directions.

Table 2 : Temps de réponse (T.R.) et pourcentages de réussite pour l'ensemble des tests.
D'après [VANN 95].

		PATIENTS				TEMOINS			
		T.R. (msec)		Scores (%)		T.R. (msec)		Scores (%)	
		moyenne	SD	moyenne	SD	moyenne	SD	moyenne	SD
Test souris	épreuve A	9051	±7957	100	0	4992	±6454	100	0
	épreuve B	13158	±11079	100	0	4699	±3176	100	0
	épreuve C	7600	±6037	100	0	3701	±2213	100	0
Jugement lexical		3901	±5003	99	±8	1606	±1668	100	0
Jugement de suites	Formes géométriques	4561	±5624	87	±33	2024	±1532	98	±11
	Mots-nombres	5161	±5549	95	±21	2229	±1864	98	±14
Production de suites	Formes géométriques	26830	±18487	98	±11	10662	±5676	99	±8
	Mots-nombres	23775	±15099	81	±39	14866	±10183	94	±23

Chez les témoins, les écarts étaient minimes entre un déplacement horizontal et un déplacement vertical voire diagonal et ce, quelle que soit l'épreuve réalisée malgré les différences de longueur de parcours (cf. Fig. V.4). Le temps nécessaire à positionner le curseur dans la cible semblait donc beaucoup plus important que celui nécessaire pour s'en approcher.

Cette observation se vérifie également chez les patients sauf lors de l'épreuve C. Curieusement, les temps de réponse y sont non significativement plus longs pour les déplacements verticaux que pour les déplacements horizontaux. Dans cette épreuve pourtant, la cible était plus facile à atteindre (cf. V.5.3).

V.5.4.2.3 Déplacements suivant les deux axes

Les déplacements en diagonale étaient légèrement plus longs que les autres, mais la différence n'était pas significative (condition*déplacement_horizontal*déplacement_vertical : $P = 0.99$). L'étude des déplacements suivant les deux axes simultanément (diagonale de 26,5 cm) est plus intéressante dans la mesure où cela correspond davantage à la réalité. Nous avons remarqué que les sujets (patients et témoins) avaient tendance dans un premier temps à scinder ce déplacement en deux déplacements distincts, l'un horizontal et l'autre vertical (cf. Fig. V.2). La tendance générale observée figure V.3 se retrouve figure V.4. Si l'on regarde les temps moyens des patients pour les épreuves A et B (cf. table 3), on observe une grande dispersion des performances [5,9 s ; 12,9 s] et [12,9 s ; 17,5 s]. Dans l'ordre des performances les plus faibles jusqu'au meilleures nous avons :

- le déplacement diagonal **Gauche-Bas**,
- le déplacement diagonal **Gauche-Haut**,
- le déplacement diagonal **Droit-Haut**,
- le déplacement diagonal **Droit-Bas**.

Nous avons observé que pour l'épreuve B, le temps moyen de déplacement Gauche-Haut (17,5 s) était très à l'écart des performances moyennes observées dans les trois autres directions [12,9 s ; 13,7 s]. Ce n'est pas une tendance générale car seuls trois patients ont manifesté une gêne lors de ce déplacement suivi d'un "clic" souris (respectivement 30,040 s ; 45,150 s et 52,350 s). Ce stimulus était le deuxième déplacement diagonal proposé aux malades lors de cette épreuve, il apparaissait en milieu de parcours et avait d'autre part déjà été rencontré lors de l'épreuve A. La seule explication que nous trouvons est une difficulté à centrer le curseur dans la fenêtre cible en coordination avec un appui sur un des boutons de la souris.

Table 3 : Temps de réponses moyens selon le type de déplacement et l'épreuve.

Lat.	Vert.	Patients (T.R. msec)						Témoins (T.R. msec)					
		A		B		C		A		B		C	
		moy.	SD	moy.	SD	moy.	SD	moy.	SD	moy.	SD	moy.	SD
D	-	6851	±4538	13361	±17734	6115	±3754	4421	±5292	4293	±2292	3796	±2237
G	-	8921	±9551	10220	±10017	6497	±5274	3848	±5213	4056	±3280	2986	±1342
-	B	9096	±9756	10938	±8416	7933	±7305	3381	±2518	4324	±2461	3182	±1860
-	H	7569	±5553	11882	±8656	7684	±6923	4021	±4038	4356	±2859	2985	±1619
D	B	5929	±3924	13668	±11517	8412	±8571	4038	±3492	4878	±3662	4340	±3288
G	B	12868	±20678	12863	±10449	9138	±8913	3531	±3136	4575	±3026	4403	±2395
D	H	8952	±9191	13868	±12652	6812	±4197	7965	±13213	5446	±5150	3708	±2796
G	H	11095	±10001	17528	±18335	7559	±5759	5393	±8080	5586	±3979	4445	±3227

T. R. : Temps de réponse en milli-secondes ; Lat. : Latéral ; Vert. : Vertical ; D : Droite ; G : Gauche ; B : Bas ; H : haut.

V.5.5 Discussion

Les pourcentages de réussite observés montrent que les patients ont tous réussi chacune de ces trois épreuves (cf. table 2, 100% de réussite dans chaque cas), même si des différences significatives existent entre patients et témoins au niveau des temps de réponse.

On observe que les temps diminuent d'une épreuve à l'autre pour les témoins (cf. Fig. V.3). Cela peut être dû à un effet d'apprentissage sans que nous ne puissions l'affirmer avec certitude, puisque toutes les personnes ont effectué les épreuves dans le même ordre (il serait donc intéressant de proposer l'épreuve C avant l'épreuve B à de nouveaux malades afin de vérifier s'il existe des différences significatives à ce niveau).

On constate également cette tendance chez les patients pour les épreuves A et C. Les temps supérieurs observés en B pour ces sujets peuvent être dus au fait qu'il était nécessaire d'appuyer sur un bouton de la souris lorsque l'icône était bien placée. Les patients auraient donc accusé une gêne plus importante que les témoins lorsqu'il fallait accompagner le positionnement de l'icône d'un "clic" souris.

Finalement nous pouvons dire que des patients, même lorsqu'ils présentent des troubles moteurs, sont capables d'utiliser une souris et d'effectuer les gestes volontaires adéquats. Il existe une différence importante entre patients et témoins dans les temps de réponse, suivant un rapport qui va en général du simple au double, l'augmentation des latences des temps de réponse est d'ailleurs fréquemment rapportée chez les patients cérébro-lésés [NAK 77, MILN 86, GODE 95].

On notera également que plus le rapport (surface de l'icône/surface de la fenêtre à "cliquer") est faible et donc favorable puisque nécessitant une précision moindre, plus l'interaction entre le malade et l'interface sera confortable. On a donc intérêt à prendre des cases de grande taille par rapport à la taille du curseur de la souris.

Ces épreuves ne nous permettent toutefois pas d'évaluer le comportement des patients dans un environnement plus complexe qui présenterait plusieurs fenêtres contenant elles-mêmes plusieurs éléments ou nécessitant une participation plus active et autonome du malade. L'étude réalisée ci-dessous va dans ce sens puisqu'on y étudie le comportement du malade lors d'épreuves qui requièrent une charge cognitive plus importante et laissent au malade une autonomie importante dans ses décisions et gestes. Pour ces épreuves le niveau socio-éducatif ainsi que l'âge sont des variables qui peuvent avoir des répercussions sur la qualité des réponses.

V.6 Evaluation de l'aptitude à utiliser l'I.H.M. de L.A.R.A.

V.6.1 Présentation

L'étude suivante s'intéresse directement au comportement des patients vis-à-vis des différentes interfaces graphiques dédiées aux exercices qui composent le système L.A.R.A. à l'heure actuelle. Ce qui veut dire que nous n'échafauderons ici aucune hypothèse visant à attribuer l'origine des erreurs faites par les malades à un déficit cognitif spécifique.

L'étude comprend deux parties. L'une est réservée à l'évaluation du comportement du malade face à l'interface des épreuves de décision, l'autre s'intéresse au comportement du malade face à l'interface utilisateur des épreuves de production, plus complexe.

V.6.2 Epreuves de jugement

V.6.2.1 Décision mot-nombre/non(mot-nombre)

V.6.2.1.1 Introduction

Les items présentés aux patients lors de cette épreuve sont ceux de la batterie de test évoquée précédemment (cf. IV.6.3.2). Nous utilisons à cet effet l'interface utilisateur de

jugement (cf. Fig. IV.13) pour laquelle l'item est réduit à un mot unique présenté au dessus de la fenêtre réponse, dont le titre "le mot vous paraît " apparaît en lieu et place du titre "la suite vous paraît" des épreuves de jugement de suites. Item et cadre de réponse sont donc légèrement décalés à droite de l'écran, ce qui peut avoir son importance pour des patients présentant une hémiparésie visuo-spatiale.

Lors de cette épreuve, le patient avait simplement à déplacer le curseur de la souris initialement placé à égale distance des cases "Bon" et "Mauvais" (cf. Fig. IV.13) vers la case qu'il jugeait adéquate et à valider ce choix à l'aide d'un "clic" souris.

Le positionnement du curseur dans une zone médiane neutre garantissait des conditions initiales identiques pour chaque item. Cela évitait également de prendre en compte des "clics" intempestifs (la réponse comprenait donc un mouvement volontaire du malade qui déplaçait le curseur de la zone neutre vers la case réponse choisie avant de valider ce choix), ce qui n'aurait bien évidemment pas été le cas si le curseur restait dans la case réponse choisie pour l'item précédent.

Avant de réaliser le test, chacun des sujets était entraîné à l'aide d'une session composée de six stimuli.

Le déroulement de cette épreuve avait lieu après l'épreuve de jugement de suites de formes géométriques et avant l'épreuve de jugement de suites de mots-nombres.

V.6.2.1.2 Résultats

V.6.2.1.2.1 Analyse descriptive

Tous les patients ont été en mesure de réaliser cette épreuve. Contrairement aux témoins qui n'ont effectué aucune erreur lors de cette épreuve, nous avons constaté quelques erreurs chez les patients (cf. table 2). En fait, trois patients seulement ont fait chacun une erreur. Ces erreurs concernaient pour tous les trois une erreur d'appréciation d'un mot-nombre qu'il ont jugé comme n'en étant pas un. Ce faible taux d'erreur ne remet pas en cause l'utilisation de l'interface par les malades. Dans cette épreuve pourtant, il fallait une grande précision puisque le déplacement à effectuer n'était à l'écran que de un centimètre environ pour atteindre la case choisie, case qui ne mesurait pas davantage en hauteur.

Nous avons remarqué que tous les sujets (patients et témoins) ont donné un avis tranché et qu'aucun n'a choisi la case "Je ne sais pas".

V.6.2.1.2.2 Analyse statistique

Les temps de réponse et les pourcentages de réussite ont été analysés à l'aide d'ANOVAs à trois facteurs : groupe (patient, témoin), réponse_précédente (0 : différente, 1 : identique) et condition (mot-nombre, non(mot-nombre)). La transformée logarithmique du temps de réponse et les taux de bonnes réponses (B.R.) étaient les variables dépendantes.

V.6.2.1.2.2.1 Temps de réponse

Les temps de réponses étaient plus longs chez les patients que chez les témoins (cf. table 2), mais cette différence n'était pas significative (df : 1 ; F : 2.64 ; P = 0.1).

L'effet des facteurs réponse_précédente (df : 1 ; F : 1.25 ; P = 0.2) et condition (df : 1 ; F : 0.69 ; P = 0.4) n'était pas significatif.

L'interaction groupe*condition (df : 1 ; F : 5.78 ; P = 0.03) était significative et ceci était lié au temps plus long chez les patients pour rejeter les items non(mot-nombre) et au temps plus faible chez les témoins pour rejeter ces mêmes items (cf. Fig. V.5).

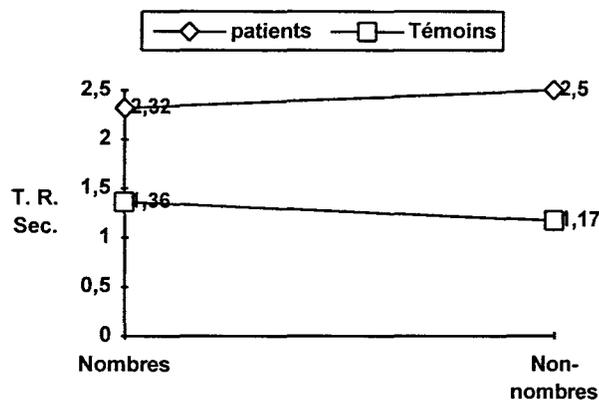


Figure V.5 : Temps de réponse (T. R.) des patients et témoins en fonction du type de stimulus.

V.6.2.1.2.2.2 Qualité des réponses

Contrairement aux témoins, les patients ont réalisé quelques erreurs (cf. table 2). Comme nous l'avons signalé dans l'analyse descriptive, trois patients ont commis chacun une erreur. Ces erreurs concernaient à chaque fois un mot-nombre qui fut jugé comme n'en étant pas un.

V.6.2.1.3 Discussion

Ces résultats montrent que les patients étaient capables d'utiliser l'interface graphique réalisée pour le compte des épreuves de décision. La souris est donc un outil parfaitement

adapté à l'usage des patients cérébro-lésés dans ce type d'application. Enfin, l'utilisation de cet outil permet de montrer une différence dans le temps de réponse en fonction de la réponse (mot-nombre/non(mot-nombre)) dans les deux groupes malgré des performances très proches en terme de taux de bonnes réponses. Ce résultat pourrait fournir des indices au thérapeute pour explorer la stratégie des sujets pour la décision de la réponse.

V.6.2.2 Jugement de suites

V.6.2.2.1 Introduction

Les deux épreuves de jugement de suites (formes géométriques et mots-nombres, cf. IV.6.2.1 et IV.6.3.3) ont été analysées simultanément. Pour chacun des items de ces épreuves, il était demandé aux sujets de choisir parmi trois réponses ("Bonne", "Mauvaise", "Je ne sais pas"), celle qui répondait à la question : "la suite vous paraît ?" selon la consigne donnée en début d'exercice.

En jugement de suites de formes géométriques, cette consigne était : « répondez "bonne" si la suite est croissante de la gauche vers la droite et "mauvaise" dans le cas contraire », alors qu'en jugement de mots-nombres la consigne était : « répondez "bonne" si la suite correspond à un nombre existant, et "mauvaise" dans le cas contraire ».

L'interface utilisée lors de ces épreuves est celle présentée figure IV.13.

Comme pour l'épreuve de décision lexicale, le patient avait simplement à déplacer le curseur de la souris, initialement placé à égale distance des cases "Bon" et "Mauvais" (cf. Fig. IV.13) vers la case qu'il jugeait adéquate et à signifier ce choix à l'aide d'un "clic" souris.

Avant de réaliser les tests, chacun des sujets était entraîné à l'aide d'une session composée de six stimuli.

V.6.2.2.2 Résultats

V.6.2.2.2.1 Analyse descriptive

Pour l'ensemble des sujets, l'épreuve de jugement de suites de formes géométriques s'est déroulée avant l'épreuve de jugement de suites de mots-nombres.

Quelques témoins ont commis des erreurs. Comme nous allons le voir, ces erreurs furent surtout produites lors de l'épreuve de jugement de suites de mots-nombres. Les patients par contre, ont commis davantage d'erreurs en moyenne lors du jugement de suites géométriques que lors de l'épreuve de jugement de suites de mots-nombres où leurs scores sont voisins de ceux établis par les témoins.

En **jugement de formes**, seul un témoin a commis des erreurs. Toutes correspondent à une généralisation de la consigne à toutes les suites d'allure croissante ou décroissante régulièrement, puisque les suites strictement décroissantes furent jugées "bonnes". Il en va différemment pour les patients. Si l'un d'eux a commis beaucoup d'erreurs en début de session en répondant "bonne" systématiquement, par la suite, ses résultats étaient tout à fait corrects. En revanche, trois patients ont commis beaucoup d'erreurs lors de cette épreuve. Ces erreurs se sont produites pour les stimuli à trois éléments et surtout pour ceux à quatre éléments. En fait, ces patients jugeaient "Bonne", les suites qui se terminaient de façon croissante alors qu'elles présentaient une décroissance initiale ou lorsqu'elles étaient strictement décroissantes (cf. Fig. IV.18, allures n°4 et n°2). Nous avons également rencontré des erreurs concernant des stimuli corrects chez ces patients. Les erreurs de ce type n'ont été rencontrées que chez quatre patients sur les neuf. Quatre autres patients ont réalisé des scores de 100% de bonnes réponses et un dernier patient n'a réalisé qu'une seule erreur.

En **jugement de nombres**, seul un témoin n'a pas commis d'erreurs. Une erreur revient presque systématiquement sans distinction de groupe : "QUARANTE UN" est jugé correct.

Chez les témoins comme chez les patients, les erreurs sont dans l'ensemble en nombre assez réduit (moins de cinq sur cent trente deux stimuli présentés). Une erreur faite isolément par un patient a attiré notre attention. Ce patient a jugé "SOIXANTE QUATRE CINQUANTE" correct, en nous disant "ça se dit", il est vrai que l'activité de cette personne était la vente en moyenne surface et que cela correspondait à 64,50 Frs. Cependant, à d'autres stimuli du même type, il répondit correctement, mais en hésitant longuement.

Chez quatre patients on observe davantage d'erreurs, mais les scores restent supérieurs à 90% de bonnes réponses. On notera que chez deux de ces patients, il y a équilibre des erreurs : autant de stimuli corrects jugés incorrects que l'inverse. Chez les deux autres patients il en va différemment. Chez l'un, la majorité des erreurs (70%) sont dues à des items incorrects jugés bons, alors que chez l'autre patient, 90% des erreurs sont dues à des items corrects jugés mauvais.

Témoins et patients ont tous réussi à faire les épreuves (formes et mots-nombres) dans leur totalité. L'une d'elle comportait beaucoup de stimuli (132 en jugement de mots-nombres). Si la majorité des patients réalisaient cette épreuve en un quart d'heure environ, le patient le plus gravement atteint eut besoin quant à lui de trente cinq minutes pour réaliser cette épreuve en totalisant néanmoins plus de 92% de bonnes réponses. Par contre, ce même patient avait éprouvé beaucoup de difficultés à réaliser l'épreuve de jugement de suites de formes géométriques (62% de bonnes réponses), dans un temps lui aussi beaucoup plus élevé que

celui observé chez la majorité des patients. Les erreurs observées chez ce malade lors de cette épreuve consistaient à voir "bonnes", l'ensemble des suites proposées en début de test, quelles soient correctes ou non. On ne peut conclure dans ce cas à une origine des erreurs liées à l'utilisation de l'interface, puisqu'elles n'étaient pas le fruit du hasard. Les grandes difficultés motrices de ce patient ne l'avaient donc pas empêché d'utiliser correctement une interface demandant beaucoup de précision (taille réduite des cases réponse).

V.6.2.2.2.2 Analyse statistique

Les temps de réponse et les pourcentages de réussite ont été analysés à l'aide d'ANOVAs à cinq facteurs : groupe (patient, témoin), épreuve (formes, mots-nombres), réponse_précédente (0 : différente, 1 : identique), condition (bon, mauvais) et longueur_du_stimulus (2, 3 ou 4 éléments). La transformée logarithmique du temps de réponse et les bonnes réponses (B.R.) étaient nos variables dépendantes.

V.6.2.2.2.1 Temps de réponse

Les temps de réponse des patients étaient globalement plus longs que ceux des témoins, mais cette différence n'était pas significative (df : 1 ; F : 1.88 ; P = 0.2).

Les temps de réponse des deux épreuves étaient proches (df : 1 ; F : 0.99 ; P = 0.3) et l'interaction groupe*épreuve n'était pas significative (P = 0.8).

Les temps de réponse étaient plus longs lorsque la réponse précédente était différente à la réponse actuelle (df : 1 ; F : 44.2 ; P = 0.0001) et cet effet ne différait pas significativement selon le groupe (groupe*réponse_précédente : P = 0.6), le test (épreuve*réponse_précédente : P = 1), la condition (condition*réponse_précédente : P = 0.2) ou la longueur du stimulus (longueur_du_stimulus* réponse_précédente : P = 0.4).

Les temps de réponse étaient globalement plus longs lorsque l'item n'était pas correct (df : 1 ; F : 5.17 ; P = 0.04) et cet effet ne différait pas selon le groupe (groupe*condition : P = 0.5) ou la longueur du stimulus (condition*longueur_du_stimulus : P = 0.3). En revanche, l'effet était légèrement plus marqué pour l'épreuve utilisant les nombres (condition*épreuve : P = 0.08) (cf. Fig. V.6).

Enfin, l'effet global de la longueur du stimulus n'était pas significatif (P = 0.2) et ne différait pas significativement selon le groupe (groupe*longueur_du_stimulus : P = 0.7) ou selon l'épreuve (épreuve*longueur_du_stimulus : P = 0.07), bien que les temps de réponse étaient plus longs lors de l'épreuve utilisant les mots-nombres.

Aucune des interactions à trois facteurs n'était significative.

Au total, cette analyse montrait donc que les temps de réponse étaient plus courts lorsque le stimulus était correct et la réponse identique à celle du stimulus précédent.

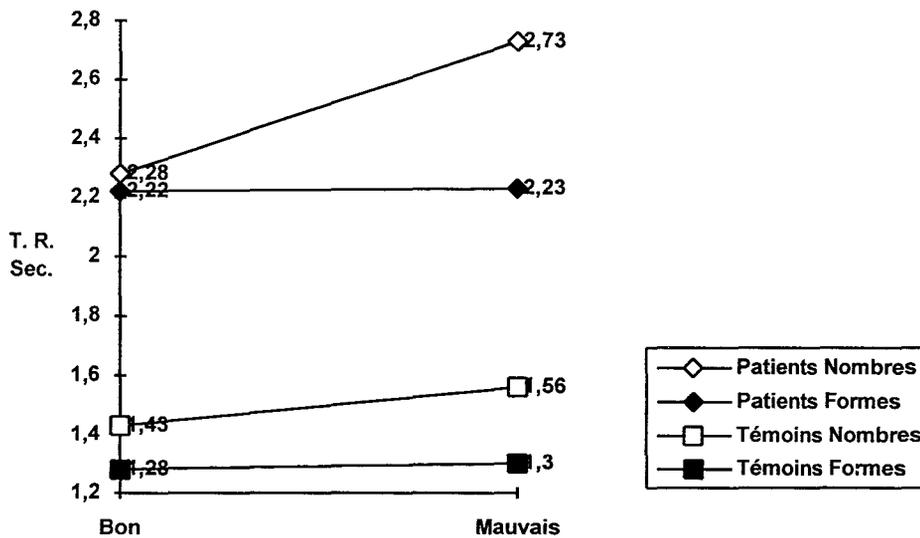


Figure V.6 : Temps de réponse (T.R.) des patients et témoins en fonction du type du stimulus (bon, mauvais) et de l'épreuve (formes géométriques, mots-nombres).

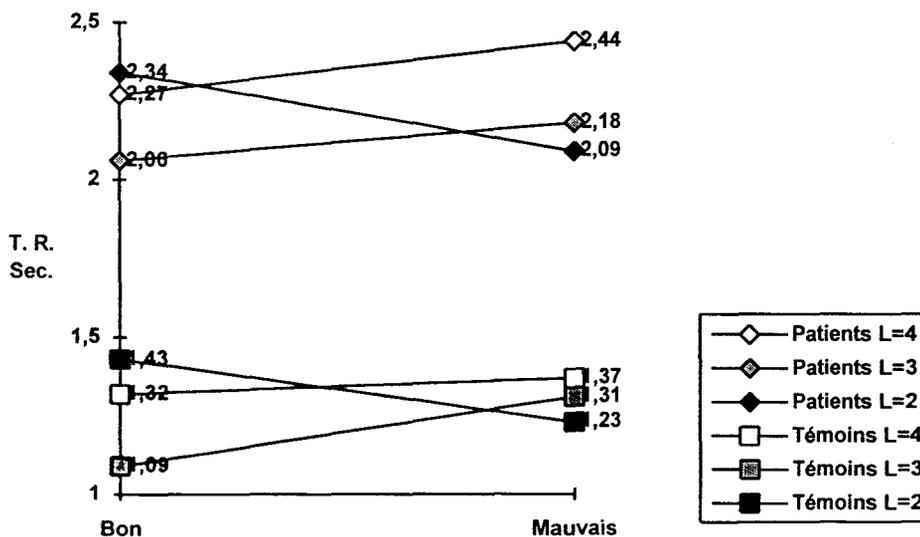


Figure V.7 : Temps de réponse (T.R.) des patients et témoins en fonction de la longueur (2, 3, 4) et du type (bon, mauvais) de la suite de formes géométriques.

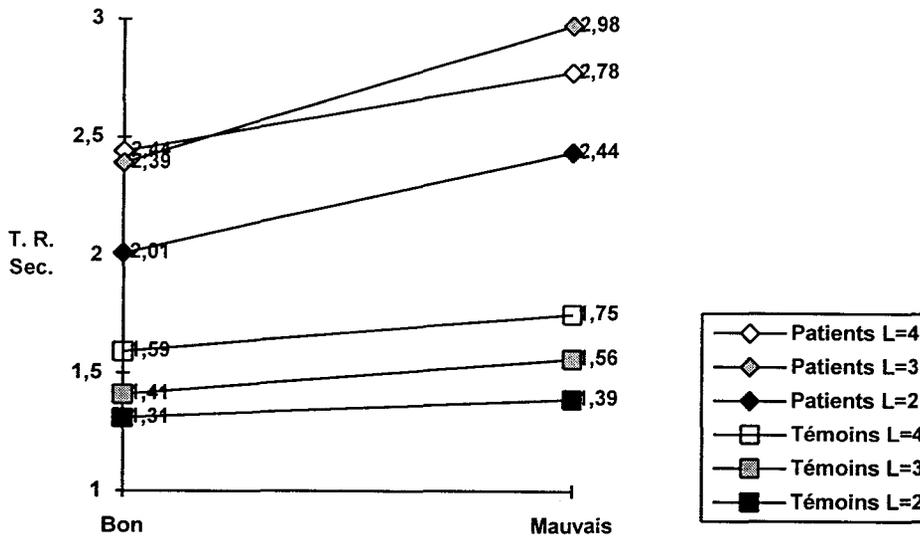


Figure V.8 : Temps de réponse (T.R.) des patients et témoins en fonction de la longueur (2, 3, 4) et du type (bon, mauvais) de la suite de mots-nombres.

V.6.2.2.2.2 Qualité des réponses

Malgré des scores de 100% de bonnes réponses, plus fréquents chez les témoins (5/6 pour l'épreuve des formes) que chez les patients (4/9 pour l'épreuve des formes), la comparaison des moyennes des groupes (cf. table 2) n'était pas significative (df : 1 ; F ; 2.8 ; P = 0.1) (cf. table 2).

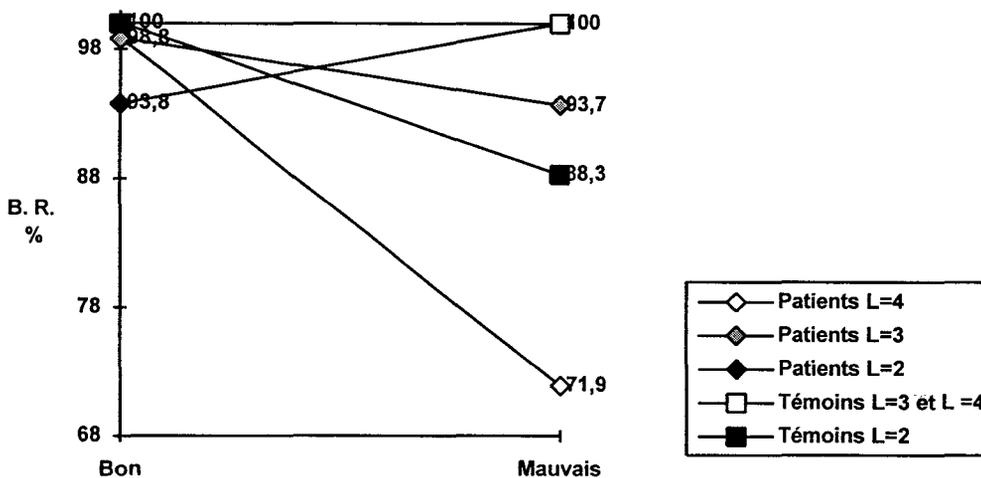


Figure V.9 : Scores de Bonnes réponses (B.R.) des témoins et patients en fonction de la longueur (2, 3, 4) et du type (bon, mauvais) des stimuli pour le jugement des formes.

Aucun des effets principaux et des interactions n'étaient significatifs. En revanche chez les patients, le rejet correct des stimuli était meilleur pour les stimuli de deux éléments (P =

0.03) que pour les autres (trois et quatre éléments) quelque soit l'épreuve (cf. Fig. V.9 et Fig. V.10).

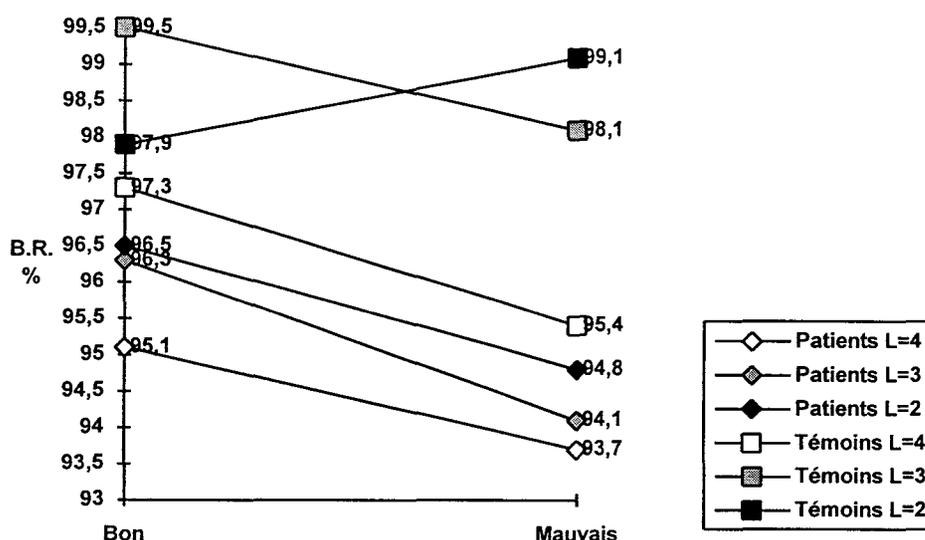


Figure V.10 : Scores de Bonnes réponses (B.R.) des témoins et patients en fonction de la longueur (2, 3, 4) et du type (bon, mauvais) des stimuli pour le jugement des nombres.

V.6.2.2.3 Discussion

Ces analyses de groupes suggèrent donc que les performances et notamment la rapidité de réponse sont susceptibles d'être influencées par des facteurs spécifiques comme la nature de la réponse (acceptation ou rejet) ou des effets séquentiels (effet de la réponse précédente).

Par ailleurs, l'analyse de groupe ne reflète pas les difficultés propres à chaque patient témoignant de l'hétérogénéité de leurs déficits.

Ces résultats sont susceptibles de donner des indices pour l'évaluation ultérieure de déficits spécifiques de patients cérébro-lésés dans le cadre d'une étude finalisée.

Pour le présent travail, le résultat important réside dans la faisabilité de ce type d'évaluation chez des malades neuropsychologiques. Les tests s'étaient toujours déroulés dans de bonnes conditions et étaient achevés par les patients. Ils permettaient de mettre en évidence une diminution de performance chez certains d'entre eux et des effets spécifiques des conditions expérimentales sur les performances autorisant leur utilisation ultérieure dans le cadre d'études évaluant des hypothèses spécifiques.

V.6.2.3 Hiérarchisation de suites

V.6.2.3.1 Introduction

Les deux épreuves de production de suites (formes géométriques et mots-nombres, cf. IV.6.2.2, IV.6.3.4) ont été analysées simultanément. Pour chacun des items de ces épreuves, il était demandé aux sujets de :

- construire une suite croissante de formes géométriques de la gauche vers la droite,
- construire un mot-nombre syntaxiquement correct et représentant la plus grande quantité réalisable **inférieure à mille**.

L'interface utilisée lors des épreuves est celle présentée figure IV.14.

L'interaction est ici beaucoup plus complexe que lors des épreuves de jugement. Il est demandé aux patients de :

- 1) sélectionner un élément du stimulus en plaçant le curseur de la souris dans la fenêtre correspondante et de valider ce choix par un "clic",
- 2) sélectionner la case de la réponse correspondant à l'endroit où sera disposé cet élément en déplaçant le curseur vers cette case et en validant à nouveau d'un "clic".

Ces deux étapes doivent être répétées autant de fois qu'il y a d'éléments dans le stimulus. Ensuite, lorsque le sujet a produit sa réponse, celui-ci doit l'indiquer au système en venant "cliquer" dans la fenêtre "validation" du menu exploitation.

Comme les risques d'erreur sont ici importants, nous avons autorisé les sujets à corriger leur réponse aussi longtemps que celle-ci n'a pas été validée. Dans ces conditions, la réponse est à reformuler entièrement et nous ne tenons compte que de la réponse validée bien entendu.

Lors de ces épreuves et pour chaque item, nous plaçons le curseur de la souris à droite des éléments qui le composent et au niveau du milieu de la pile ainsi constituée (cf. Fig. IV.14). Cela réalise une condition initiale sensiblement identique d'un item à l'autre (cette C.I. varie légèrement en fonction du nombre d'éléments puisque nous nous plaçons au niveau du milieu de la pile) qui nous permet d'évaluer statistiquement les temps nécessaires à choisir le premier élément de réponse.

Avant de réaliser les tests, chacune des personnes avait l'occasion de s'entraîner à l'aide d'une session composée de six stimuli du même ordre que ceux du test.

V.6.2.3.2 Résultats

V.6.2.3.2.1 Analyse descriptive

Comme nous l'avons précisé en introduction, la tâche du sujet était accrue lors de ces épreuves. L'environnement lui-même était plus complexe dans la mesure où davantage d'informations étaient présentes : zone *item* (deux à quatre éléments), zone *réponse* (deux à quatre éléments), zone *exploitation* (trois éléments) et éventuellement *votre réponse fausse* était lorsque le sujet avait recommencé sa réponse.

Les témoins étaient plus à l'aise dans cet environnement que les patients qui avaient quelques difficultés lorsqu'apparaissait la fenêtre "votre réponse fausse était". Plusieurs d'entre eux avaient tendance à vouloir mettre leur nouvelle réponse en lieu et place des éléments se trouvant dans cette zone "ancienne réponse" plutôt que dans la zone "réponse" située en bas de l'écran et réinitialisée au passage (cf. Fig. V.11).

Nous avons également noté que les patients évitaient généralement de traverser des fenêtres dans lesquelles ils n'avaient pas l'intention d'effectuer une action. Ainsi, après avoir sélectionné un élément de l'item, les patients quittaient la zone "Formes" ou "Nombres" et déplaçaient le curseur le long de cette zone en évitant les zones alentour. De la même façon, ils déplaçaient le curseur entre la zone "réponse fausse" et la zone "réponse" ou entre la zone "réponse" et le bas de l'écran. Il est indéniable que cela les ralentissait considérablement.

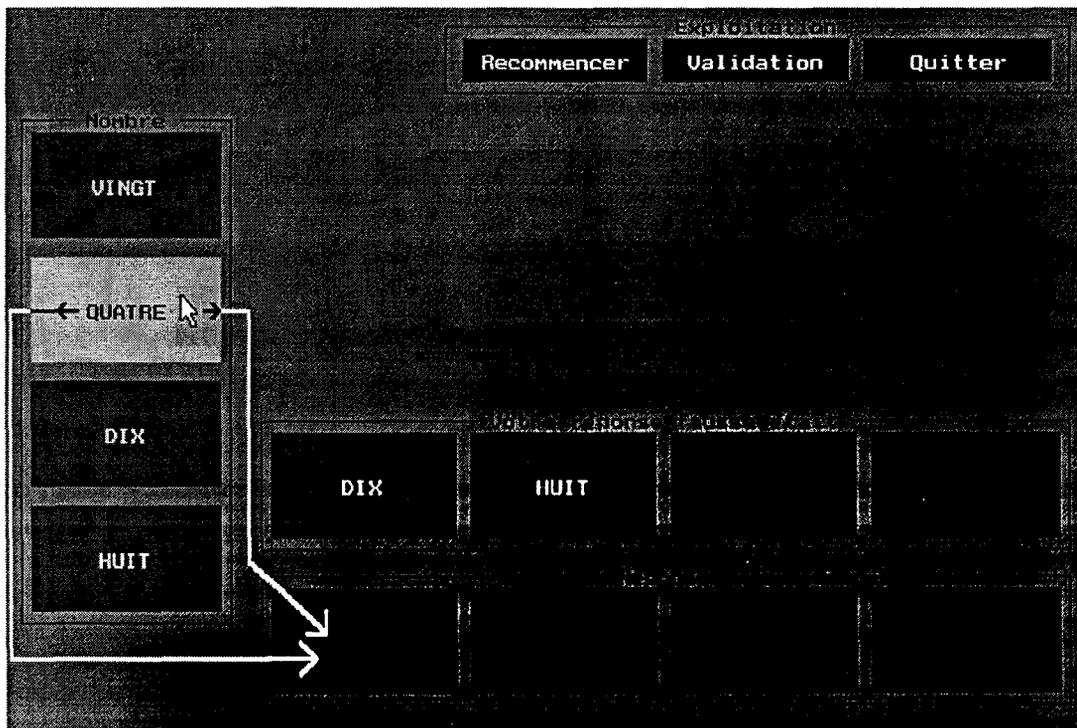


Figure V.11 : Parcours du curseur chez certains patients.

Quatre témoins sur six (66%) ont réalisé l'épreuve de **production de suites géométriques** sans erreurs, les deux autres personnes n'ont commis qu'une seule erreur, due certainement à la précipitation puisque dans chaque cas ne manquait que le dernier élément de la suite.

Chez les patients, cinq d'entre eux (55%) n'ont réalisé aucune erreur lors de cette épreuve. Si pour un patient, la seule erreur commise était du même type que celle commise par les témoins, en revanche deux patients ont commis chacun deux erreurs concernant des suites dans lesquelles manquaient un élément qui aurait dû être intercalé. Il s'agit là peut-être d'une erreur de manipulation, ces personnes ayant pu valider alors qu'elles auraient dû recommencer. Chez un patient, les résultats étaient plus critiques puisque celui-ci n'a fourni aucune bonne réponse (0% de B.R.) et avait déjà commis beaucoup d'erreurs lors de l'épreuve de jugement de suites géométriques. Ce patient qui présentait de graves difficultés motrices était capable néanmoins de réaliser la tâche. En fait, pour la plupart des items, celui-ci se contentait de mettre un unique élément de réponse (en général le plus grand) qu'il s'empressait de valider. Une grande lenteur d'exécution caractérisait aussi ce patient pour lequel il a fallu trois demi-journées pour réaliser les tests. La production des mots-nombres fut encore plus laborieuse et nous décidâmes de suspendre la session après quarante cinq minutes alors que le patient n'avait traité que treize stimuli, tous de façon incorrecte. Les résultats de ce patient furent exclus de l'analyse statistique des épreuves de production.

En **production de nombres**, seul un témoin a réalisé le sans fautes. Une erreur revient systématiquement chez les autres témoins et concerne l'item "CENT QUATRE VINGT HUIT" pour lequel la réponse donnée était "HUIT CENT VINGT QUATRE" au lieu de "HUIT CENT QUATRE VINGT". Cependant, pour l'item "QUATRE QUATRE CENT VINGT" du même type, ces témoins donnèrent la bonne solution. Il s'agit là généralement de leur unique erreur.

Un témoin à quant à lui réalisé 19% d'erreurs. Elles concernent dans tous les cas les expressions dans lesquelles se trouvait le mot "CENT" associé à un ou deux éléments de la catégorie lexicale des unités. Si l'usage veut que nous obtenions des solutions du type *Unité₁ Cent Dizaine Unité₂*, avec unité₁ plus grand que unité₂, nous observions le contraire, donc des expressions du type "TROIS CENT SOIXANTE NEUF". Un autre témoin a lui aussi réalisé des erreurs du même type mais son taux d'erreur n'est que de 7,6%. Les erreurs de ce type se retrouvent aussi chez les patients.

Pour cette épreuve, seuls les résultats de six patients ont été pris en compte, car trois malades ont présenté des difficultés trop importantes.

Deux patients réalisent 21% d'erreurs, toutes du type évoqué ci-dessus. Pour ces personnes, nous avons constaté que cette difficulté se généralisait aux expressions de type *Unité Cent* (ex : "CENT TROIS" au lieu de "TROIS CENT"). Par contre lorsque les expressions comportaient davantage d'éléments, ces patients étaient à même de réaliser des expressions multiplicatives.

Un autre patient réalise quant à lui 27,6% d'erreurs. Ses erreurs sont du même type que celles commises par les témoins auxquelles il faut ajouter une erreur pour l'item "QUATRE QUATRE CENT VINGT" (QUATRE CENT VINGT QUATRE). Nous avons tenu à ajouter au nombre des erreurs des expressions qui bien que correctes et représentant le nombre le plus grand possible ne respectaient pas totalement la consigne (inférieur à mille), parce que ce patient fut le seul à produire des expressions de ce type. Ce patient nous a fourni en effet un nombre important d'expressions du type "ONZE CENT..." en réponse à des stimuli contenant "CENT" et un nombre particulier.

Un patient a quant à lui commis 37% d'erreurs (39 au total sur 105 items). Vingt de ces erreurs ont eu lieu lors de la présentation des trente-quatre premiers items. Ces erreurs consistaient au départ à ne prendre qu'une partie des items pour formuler une réponse qui ne contenait aucun lieu multiplicatif (Unité CENT). Par la suite, les réponses données étaient complètes, mais avec des erreurs du type de celles effectuées par les témoins.

Enfin deux patients n'ont commis respectivement que une et cinq erreurs.

Pour terminer, nous voudrions souligner l'influence que peut avoir la présentation de l'item. Lorsque la lecture de haut en bas de cet item correspondait à un nombre existant, beaucoup de patients recopiaient cet item sous cette forme sans chercher à vérifier s'il existait une autre solution représentant une quantité plus grande.

V.6.2.3.2 Analyse statistique

Les temps de choix du premier élément, les temps de réponse et les pourcentages de réussite ont été analysés à l'aide d'ANOVAs à trois facteurs : groupe (patient, témoin), épreuve (formes, mots-nombres), longueur_du_stimulus (2, 3 ou quatre éléments). Dans un second temps, l'effet du nombre d'éléments mal positionnés dans les stimuli de longueur quatre fut évalué par une ANOVA à trois facteurs : groupe (patient, témoin), épreuve (formes, mots-nombres) et nombre d'éléments mal placés d'emblée dans l'item (0, 2, 3 ou 4). La transformée logarithmique du temps nécessaire à effectuer le premier choix (délai entre la présentation du stimulus et la première sélection d'un élément) et du temps total (temps nécessaire à formuler la réponse) ainsi que les taux de bonnes réponses (B.R.) étaient les variables dépendantes.

V.6.2.3.2.2.1 Temps de réponse du premier choix

Les temps de réponse pour effectuer le premier choix étaient plus longs chez les patients que chez les témoins, mais cette différence n'était pas significative ($df : 1 ; F : 3.69 ; P = 0.08$) et ne changeait pas significativement d'une épreuve à l'autre ($df : 1 ; F : 0.18 ; P = 0.6$).

L'effet global du nombre d'éléments compris dans le stimulus n'était pas significatif ($df : 2 ; F : 2.37 ; P = 0.15$) et ne différait pas significativement selon le groupe (groupe*longueur_du_stimulus : $P = 0.5$) ni l'épreuve (épreuve* longueur_du_stimulus : $P = 0.09$) (cf. Fig. V.12).

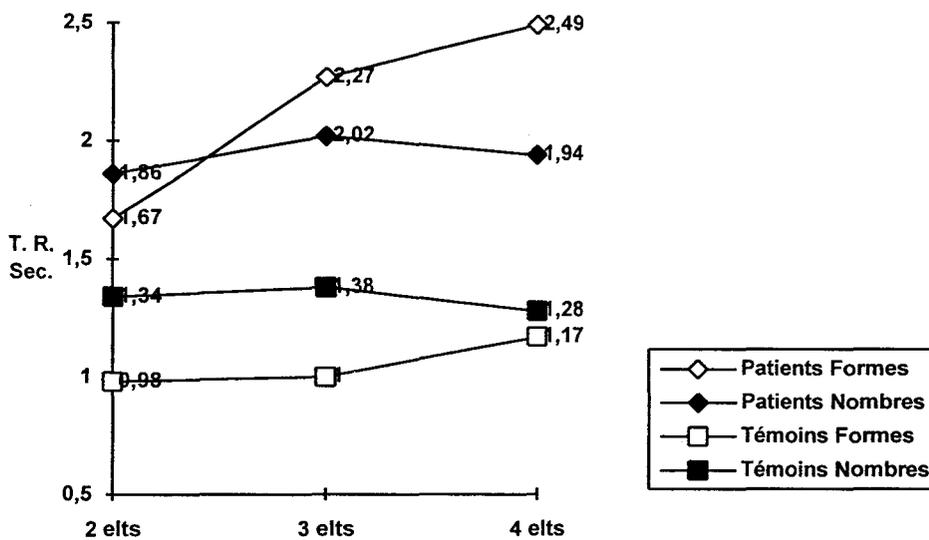


Figure V.12 : Temps moyen du premier choix (T.R.) en fonction du nombre d'éléments de l'item.

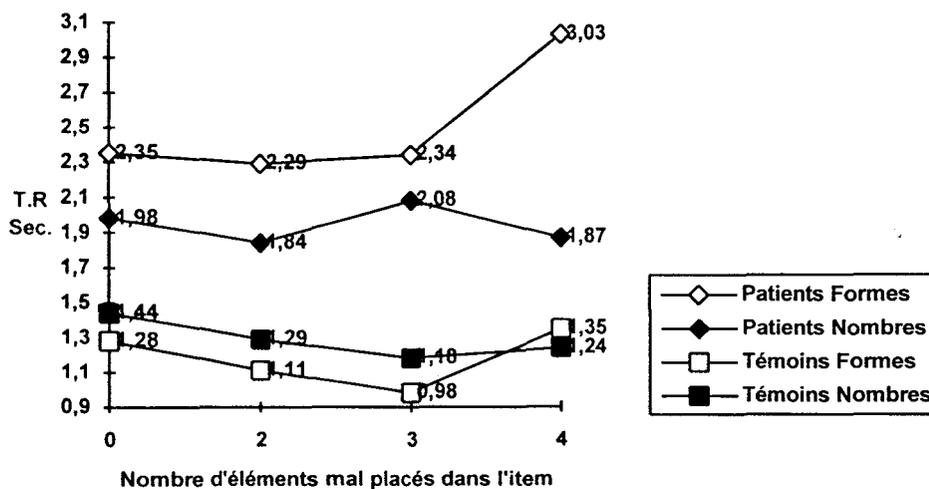


Figure V.13 : Evolution du temps moyen de première décision (T.R.) selon le nombre d'éléments mal placés dans les items de quatre éléments.

Cependant, les Temps de réponse du premier choix pour les stimuli de longueur quatre étaient significativement plus longs ($df : 1 ; F : 4.96 ; P = 0.05$) et ceci prédominait dans l'épreuve utilisant les formes géométriques ($df : 1 ; F : 4.42 ; P = 0.06$).

Pour les stimuli de longueur quatre, le nombre d'éléments mal positionnés ne modifiait pas significativement le Temps de réponse du premier choix ($df : 3 ; F : 2.84 ; P = 0.1$) et cet effet ne variait pas selon l'épreuve (épreuve*nombre_mal_positionnés : $P = 0.4$) (cf. Fig. V.13).

V.6.2.3.2.2 Temps de réponse total

Les Temps de réponse totaux des patients étaient plus longs mais la différence n'était pas significative ($df : 1 ; F : 3.32 ; P = 0.09$).

Les Temps de réponse totaux différaient selon l'épreuve ($df : 1 ; F : 14.4 ; P = 0.003$) et selon des modalités différentes pour chaque groupe (groupe*épreuve : $P = 0.07$) : les temps de réponses totaux étaient plus longs pour l'épreuve utilisant les formes géométriques chez les patients, et pour l'épreuve utilisant les mots-nombres chez les témoins (cf. Fig. V.14).

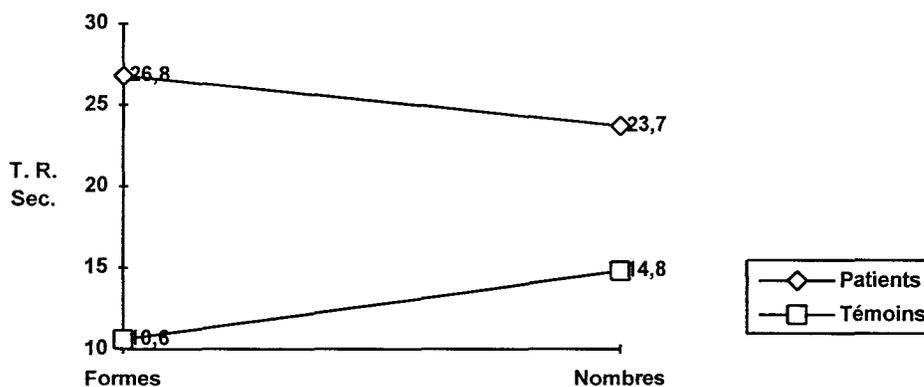


Figure V.14 : Temps de réponse moyen (T.R.) pour chaque épreuve (patients et témoins).

Les T.R. totaux augmentaient avec le nombre d'éléments contenus dans les stimuli ($df : 2 ; F : 467 ; P = 0.0001$), mais cet effet ne différait pas significativement selon le groupe (groupe*longueur_du_stimulus : $P = 0.19$) ni selon l'épreuve (épreuve*longueur_du_stimulus : $P = 0.58$). Les comparaisons subséquentes montrèrent que l'augmentation des temps de réponse totaux des stimuli composés de trois et quatre éléments étaient supérieurs à ceux contenant deux éléments ($P = 0.0001$) (cf. Fig. V.15).

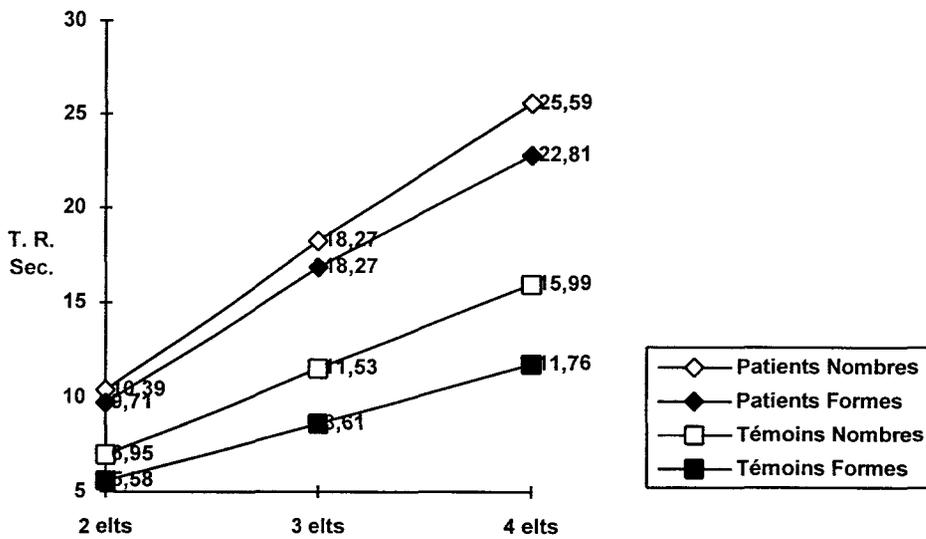


Figure V.15 : Evolution du temps de réponse (T.R.) selon le nombre d'éléments de l'item.

Enfin, l'effet global du nombre d'éléments mal positionnés n'était pas significatif ($df : 3$; $F : 2.83$; $P = 0.1$). En revanche, l'interaction groupe*nombre_mal_positionnés l'était ($df : 3$; $F : 5.61$; $P = 0.02$), témoignant d'un effet observé seulement chez les patients (cf. Fig. V.16).

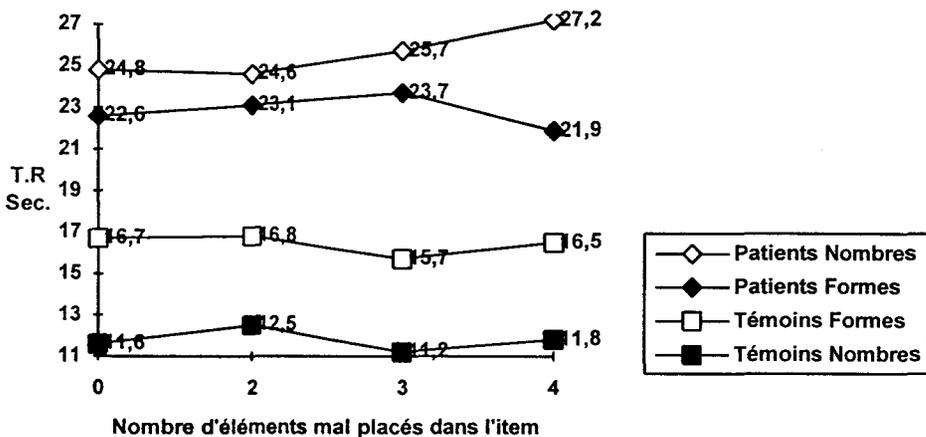


Figure V.16 : Evolution du temps total (T.R.) selon le nombre d'éléments mal placés dans les items de quatre éléments.

V.6.2.3.2.2.3 Qualité des réponses

Les scores de Bonnes réponses (B.R.) étaient globalement inférieurs chez les patients ($df : 1$; $F : 4.86$; $P = 0.05$), et à l'épreuve utilisant les mots-nombres ($df : 1$; $F : 14.72$; $P = 0.003$). La pénalisation pour l'épreuve utilisant les mots-nombres était plus importante pour les patients (groupe*épreuve : $P = 0.052$) (cf. Table 2).

L'effet global du nombre d'éléments n'était pas significatif ($df : 2 ; F : 2.36 ; P = 0.15$), mais les comparaisons subséquentes montrèrent une diminution significative des taux de Bonnes réponses pour les stimuli comportant quatre éléments ($P = 0.04$) (cf. Fig. V.17).

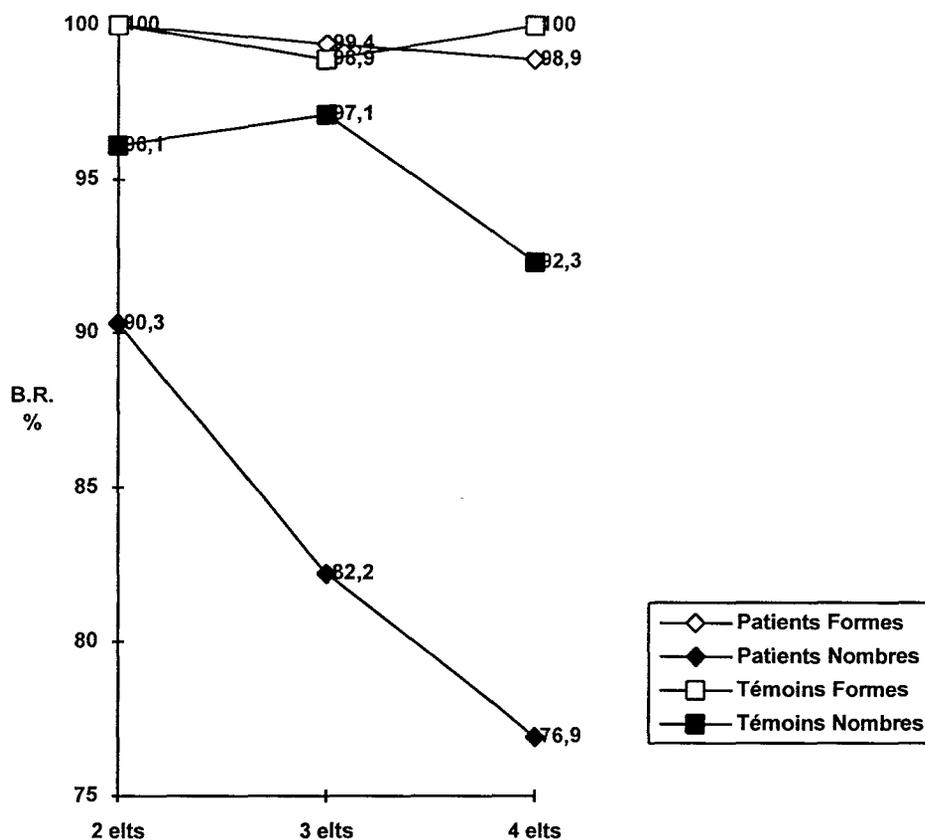


Figure V.17 : Taux de Bonnes réponse (B.R.) selon le nombre d'éléments des items.

L'effet du nombre d'éléments mal positionnés n'était pas significatif ($P = 0.38$), de même que les autres interactions (cf. Fig. V.18).

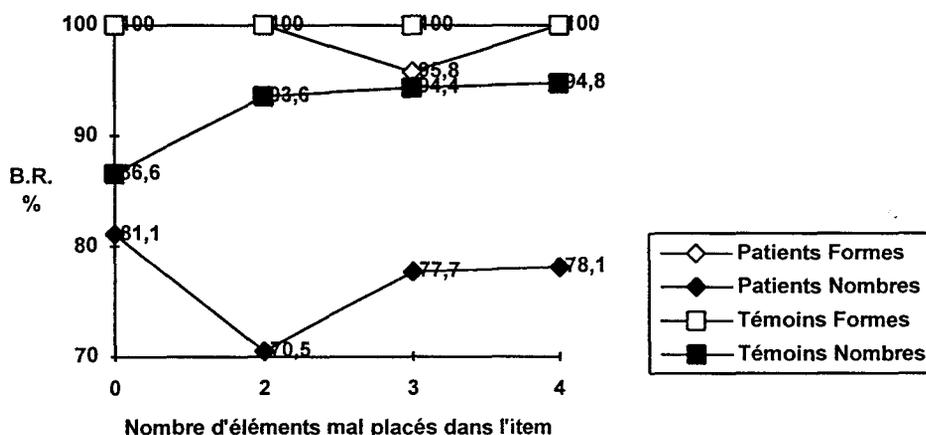


Figure V.18 : Evolution des performances selon le nombre d'éléments mal placés dans les items de quatre éléments.

Les autres interactions n'étaient pas significatives.

V.6.2.3.3 Discussion

Au total, ces analyses indiquaient donc une diminution des taux de Bonnes réponses des patients à l'épreuve de production de mots-nombres et une sensibilité de performance à des facteurs spécifiques comme le nombre d'éléments à réordonner qui influençait les trois indicateurs de performance (T.R. premier choix, T.R. total et taux de B.R.), le type d'épreuve qui influençait différemment patients et témoins et le nombre d'éléments mal positionnés qui influençait les T.R. totaux des patients seulement.

Ces épreuves étaient donc susceptibles de procurer des informations concernant les difficultés rencontrées par les patients pour effectuer différentes opérations cognitives ainsi que pour l'évaluation de facteurs influençant les performances à un test d'ordonnancement de stimuli.

L'analyse descriptive et l'analyse statistique montrent donc la pertinence de cet outil pour dégager des facteurs susceptibles d'influencer la performance des sujets sains et cérébro-lésés.

Les dernières épreuves étaient beaucoup plus complexes et ont pénalisé les performances de quelques patients dont un fut exclu de l'analyse statistique.

La difficulté des traitements cognitifs et moteurs rend vraisemblablement compte des mauvaises performances des patients.

Toutefois, lors de ces épreuves, toute fenêtre qui pouvait être sélectionnée passait en inverse vidéo lorsque le curseur la traversait, c'est le cas notamment de la zone contenant l'item. Nous avons en effet laissé la possibilité aux patients de revenir sur le choix de l'élément de l'item qu'ils avaient effectué. Il est apparu que cela a constitué une gêne pour certains patients qui avaient tendance à éviter ces fenêtres alors que rien ne pouvait se passer s'ils n'appuyaient pas sur un bouton de la souris. Il semblerait que nous leur avons laissé trop de liberté d'action à ce niveau. Cette possibilité est à laisser à des utilisateurs confirmés et à qui nous laissons aussi la possibilité d'apprendre le fonctionnement du système plus en détail. Avec des utilisateurs débutants, il est nécessaire de limiter l'interaction au strict minimum sachant qu'il ne leur est pas possible (temps d'apprentissage ou charge cognitive trop importante) de maîtriser le système immédiatement. Mais, même lorsque les résultats étaient très mauvais (un patient a réalisé 0% de réussite pour les deux épreuves de production), des réponses étaient validées.

V.7 Discussion Générale et Conclusion

La très grande majorité des malades qui ont eu accès à L.A.R.A. n'avaient jamais utilisé d'ordinateur (seule une personne sur treize s'en était déjà servi à titre professionnel). Aux

difficultés posées par l'utilisation et le fonctionnement du logiciel lui-même qui ne sont pas propres à L.A.R.A., mais à tout logiciel qu'un utilisateur découvre, s'ajoutent celles liées à l'utilisation des périphériques de communication (écran, clavier, souris).

Le but de notre travail était la mise en place d'un système permettant l'évaluation des temps de réponse et des taux de bonnes réponse de sujets normaux et cérébro-lésés pour des tâches de complexité variable.

Afin d'obtenir une évaluation la plus spécifique des fonctions cognitives d'intérêt, nous avons opté pour l'utilisation d'interfaces graphiques manipulées par l'intermédiaire de la souris. Ces options ont permis de mettre au point des épreuves d'une complexité suffisante pour être sensibles (notamment décision de suites et production de suites) mais qui demeureraient toujours faisables par les malades. En effet, les échecs observés étaient principalement liés aux déficits cognitifs. Même chez les patients avec des troubles moteurs, l'utilisation de la souris est un mode de communication acceptable au moins pour juger du taux de bonnes réponses. En revanche, le ralentissement du temps de réponse global fréquemment observé chez les patients cérébro-lésés [NAK 77, MILN 86, GODE 95] reste d'interprétation plus difficile. L'épreuve évaluant l'aptitude à utiliser la souris montrait d'ailleurs des difficultés importantes chez les malades à l'origine du ralentissement des temps de réponse.

Concernant l'utilisation du logiciel, celle-ci doit être extrêmement simple pour plusieurs raisons. La première de ces raisons est que nous n'avons pas le temps ou l'utilité d'expliquer en détail le fonctionnement du système, surtout lorsque les patients ne passent que tout ou partie des épreuves d'évaluation, pour l'instant limitées aux formes géométriques et aux mots-nombres (en décision et en production). Ensuite, il ne serait pas pertinent de donner un manuel d'emploi à des patients susceptibles de présenter des troubles du langage. Enfin, les épreuves auxquelles nous soumettons les patients sont d'une difficulté relativement simple pour des sujets sains (il en va différemment selon la gravité et la nature des lésions qui touchent les malades) et il ne faut pas que la difficulté à les mener à bien soit davantage liée à l'utilisation d'un environnement et à un matériel plutôt qu'à la difficulté intellectuelle qu'elles engendrent.

Une étape de présentation de chacune des épreuves par l'utilisation de l'environnement qui leur est dédié et par l'intermédiaire de plusieurs essais qui doivent être adaptés en fonction des handicaps du patient est nécessaire. Cela nous permet d'expliquer par la pratique ce qu'il est nécessaire d'effectuer et comment l'effectuer, puis de laisser le malade faire un apprentissage par essais et erreurs jusqu'à ce que consigne et fonctionnement du système soient assimilés. Pour chacune des épreuves, un entraînement de six stimuli représentant un

éventail très large des situations proposées semblait suffisant, à l'exception du patient qui présentait les déficits les plus graves.

Concernant l'utilisation des périphériques de communication et notamment de l'écran, aucun malade n'a négligé une partie de l'écran (hémignégligence) ou n'a rapporté de problèmes visuels (lisibilité des caractères, couleurs agressives ou mal combinées, fatigue visuelle). Ceci suggère qu'au moins une partie des patients cérébro-lésés sont capables d'utiliser cet outil. Certes, quelques petits problèmes d'utilisation furent observés, mais ils furent facilement réglés pour peu qu'on s'attardait à expliquer la raison du dysfonctionnement au malade. Ces problèmes rencontrés étaient liés à la tenue en main de la souris et non pas à des dysfonctionnements du système :

- possibilité de ramener la souris en l'air lorsqu'elle se trouve trop éloignée de soi, celle-ci ne fonctionne pas lorsque la boule entraînant les roues optiques ne touche pas correctement le support (souris en bord de table ou légèrement soulevée),
- si la souris est mal tenue en main ou utilisée avec l'avant bras orienté longitudinalement par rapport à l'écran (décalage du repère (souris/curseur) de 90° dans l'un et l'autre cas), il est extrêmement difficile de déplacer le curseur dans de bonnes conditions (mouvement de la souris à droite pour déplacer le curseur vers le bas, rapprocher la souris de soi pour aller à gauche, etc.).

Ces difficultés ne sont pas faciles à estomper car dans le déroulement des épreuves, les patients ne s'en rendent pas forcément compte et ont tendance à adopter des positions inadaptées.

Cela nous conduit à évoquer la sélection des malades en mesure d'utiliser le système L.A.R.A.. Pour certains des patients, il a fallu attendre plusieurs jours voire plusieurs semaines avant de les évaluer. Beaucoup de ces patients présentaient des troubles moteurs graves et plusieurs d'entre eux ont réalisé les tests en étant installés dans un fauteuil roulant. Bien que ces conditions n'étaient pas idéales (éloignement de la table), ils parvinrent tout de même à mener à bien les différentes tâches proposées. Tous ces malades suivaient des traitements médicaux dont certains par voie intraveineuse. Cet appareillage devait se trouver à leurs côtés et fut parfois la cause d'une gêne minime.

L'utilisation de la souris et plus généralement d'un environnement informatique est limitée aux personnes avec lesquelles un minimum de communication est possible, ne serait ce que pour leur expliquer les tâches à effectuer et pour vérifier qu'elles ont été comprises, mais aussi pour l'utilisation du système. Cela n'est pas suffisant, nous en avons fait l'expérience. Un patient était capable d'utiliser le système sans parvenir à produire des réponses correctes. La multiplication des séances d'entraînement aurait peut-être permis à ce

malade de progresser. Nous entrons ici dans le domaine de la rééducation, et ce ne fut pas l'objet de notre étude. Nous avons également exclus de l'étude des patients qui présentaient une aphasie grave, des troubles visuo-spatiaux, de conscience ou une impossibilité à se tenir assis.

L'utilisation de la souris et d'interfaces utilisateurs conviviales permet d'échapper aux erreurs de saisie qui apparaissent lorsque l'on fait appel au clavier. Le nombre élevé des touches de celui-ci ne facilite pas non plus son apprentissage. Au contraire, la souris ne nécessite que de pointer ce que l'on veut sélectionner, d'appuyer sur un bouton pour indiquer son choix, et de déplacer un curseur à sa guise par un simple mouvement du bras dans un environnement limité à ce qu'il est possible de sélectionner ou de réaliser. En supprimant les erreurs d'entrée ou de manipulation (en langue naturelle notamment), l'origine des erreurs est alors plus spécifiquement liée au facteur cognitif.

La souris est un outil qui permet de réaliser une interaction fiable et reproductible. Est-ce le meilleur ? Il est vraisemblable que non car beaucoup de personnes éprouvent des difficultés à s'en servir. Mais, il s'agit là du moyen de communication le plus utilisé actuellement. Cela contribue à diminuer son coût de revient, et constitue donc un deuxième atout d'ordre économique : le but d'un système informatisé tel que L.A.R.A. est de pouvoir être utilisé par un maximum de malades, il doit donc être conçu afin de pouvoir sortir du laboratoire et entrer chez l'orthophoniste voire chez le malade.

CONCLUSION GENERALE

La réalisation d'un tuteur à destination de personnes cérébro-lésées est une vaste entreprise pluridisciplinaire. Comme nous l'avons évoqué à plusieurs reprises, un tuteur intelligent comprend quatre éléments essentiels qui sont : l'expert, le modèle de l'élève, le pédagogue et enfin l'interface de communication homme-machine.

Le système L.A.R.A. (Logiciel d'Aide à la rééducation des aphasiques) que nous avons mis en application entre dans cette catégorie de logiciels. Un tuteur pour cérébro-lésés présente tout de même beaucoup de particularités qui le différencient d'un tuteur traditionnel. En tête de ces particularités, son public. Les difficultés rencontrées chez les patients à qui s'adresse L.A.R.A. peuvent concerner des troubles du langage. Le but avoué de ce système est nous le savons, de remédier aussi à ces déficits. Certaines épreuves de L.A.R.A. concernent donc des activités langagières pour lesquelles il risque alors de se poser un problème de communication entre l'homme et la machine. Ce problème de communication, s'il est attendu voire provoqué dans les exercices, est un handicap sérieux lorsqu'il s'agit d'avoir un dialogue cohérent avec le patient. Or, le seul moyen de communiquer avec les malades est le langage, et les modalités du langage préservées (ou altérées) sont variables d'un individu à l'autre. Cela veut dire que deux personnes qui accèdent à une épreuve identique n'ont pas forcément le même profil pathologique et si la communication annexe à la résolution de cette épreuve (dispense des consignes, manipulation du logiciel) fonctionne très bien avec l'une de ces personnes, rien ne garantit qu'il en ira de même avec l'autre personne. A terme, il faut donc envisager de réaliser un outil adaptable à chaque patient, même à ce niveau. Cela nous paraît secondaire au départ, car la mise en œuvre d'un programme thérapeutique d'évaluation ou de rééducation demande une validation de celui-ci auprès des malades. On utilisera donc dans un premier temps, un outil susceptible d'être employé par une majorité de personnes.

Suivant l'air du temps, nous avons opté pour une communication patient/machine du type souris/écran, faisant fi du sempiternel clavier 102 touches. C'était, il nous a semblé, la solution la plus rationnelle. En effet, le clavier présente beaucoup de sources d'erreurs et la recherche des touches y est longue pour qui n'est pas habitué à son usage, et a fortiori lorsqu'il s'agit d'une personne pour qui les graphèmes peuvent poser problème. Le crayon optique ne nous a pas semblé plus fiable en raison de l'absence de confirmation du choix effectué. La souris, par contre demande de pointer l'information puis de la valider.

Ce choix arbitraire de faire communiquer le malade et la machine par l'intermédiaire d'une interface utilisateur via la souris demandait à être validé expérimentalement par les

malades eux-mêmes. Nous avons à ce sujet fait d'une pierre deux coups. D'une part, les tests effectués par les malades concernaient directement les interfaces utilisateur de L.A.R.A. pour les épreuves envisagées au départ, à savoir le traitement des mots-nombres (i.e. les nombres en lettres : deux cent trente) et des suites de formes géométriques. Mais, en agissant de la sorte, nous n'étions cependant pas capables de déterminer l'origine des erreurs des malades : étaient-elles dues à une mauvaise manipulation de la souris ou à un déficit cognitif ? Pour s'affranchir de ce doute, nous avons d'autre part ajouté une épreuve préalable d'évaluation de l'aptitude à manipuler la souris indépendamment du contexte de L.A.R.A..

Les résultats observés ont dépassé nos espérances : même le patient présentant les déficits moteurs et cognitifs les plus graves était en mesure d'utiliser nos interfaces. Le mode d'interaction choisi, constitue donc un des points forts de L.A.R.A. et notre système peut être soumis à une population très large de malades, agrémenté éventuellement d'autres épreuves que celles réalisées pour l'instant, mais bâties autour d'interfaces suivant le même principe. Dès la mise en chantier de L.A.R.A. en effet, nous avons voulu réaliser un système ouvert afin de pouvoir intégrer les épreuves souhaitées par les thérapeutes dans un même environnement, mais indépendamment les unes des autres (il existe aussi une maquette concernant une épreuve de classement de cartes à jouer).

A ce jour, l'évaluation des productions des malades est essentiellement quantitative. Après chaque session, les performances du patient constituent un recueil de statistiques et notamment de pourcentages de bonnes et de mauvaises réponses selon des critères comme la longueur ou l'allure des stimuli et des réponses. Cela permet d'envisager un cadre thérapeutique de rétablissement (cf. I.5.5.2) dans lequel on tente de revalider les productions s'écartant de l'usage normal par un entraînement intensif jusqu'à aboutir à un profil correct final. La réalisation d'un tel programme nécessite de satisfaire trois conditions :

- disposer d'un programme complet et standardisé, mais adaptable en fonction des déficits constatés chez chaque patient,
- être en mesure de dispenser le programme aux malades autant de temps que nécessaire. Cela sous-entend de pouvoir accéder à ces malades durant la totalité de cette période qui peut s'étendre sur plusieurs mois,
- pouvoir conclure à l'efficacité de la thérapie.

Ces trois conditions ne sont aujourd'hui pas vérifiées. Par exemple, concernant le diagnostic et la réalisation du programme de rééducation pour le traitement des nombres, nous avons réalisé une synthèse des modèles cognitifs existants et présenté des expériences thérapeutiques (transcodages de nombres) qui ont donné des résultats probants. L'intégration d'outils d'intelligence artificielle à L.A.R.A. (générateur de systèmes experts SNARK OPEN)

permet de réaliser un système autonome capable d'établir lui-même le diagnostic, et capable aussi de proposer une thérapie en adéquation avec les déficits constatés (par l'intermédiaire du générateur d'items construisant à chaque pas le stimulus souhaité). Cette autonomie n'est possible que si les connaissances de ce système expert (diagnostic et thérapie), basées sur les modèles décrits, soient mises en œuvre et validées en partenariat avec un neuropsychologue expert des domaines concernés (chaque épreuve nécessite une expertise différente selon le domaine abordé). Et tout cela ne peut être réalisé sans la validation sur le terrain auprès des malades eux-mêmes, qui doivent avant tout être en être satisfaits au niveau du confort d'utilisation, condition indispensable à réaliser pour un système amené à être employé à de nombreuses reprises.

Pour terminer, ces systèmes peuvent être adaptés à d'autres personnes présentant des troubles du langage non acquis cette fois, et nous pensons tout particulièrement aux enfants ou aux adolescents en difficulté : l'expérience menée par Ferrand auprès de deux adolescents (cf. III. 6.6) en proie avec des difficultés dans l'écriture et la lecture des mots-nombres a produit des résultats positifs (thérapie élaborée sur la base du programme de rééducation pour aphasiques élaboré en compagnie de Deloche et Seron [DEL 87a]). Mais, en tout état de cause, ces programmes doivent être adaptés aux apprenants, et comme le disent Seron et ses collaborateurs à propos d'erreurs commises par les enfants dans des épreuves du même type : **"la mise en évidence des systèmes de règles générées par les enfants eux-mêmes à partir de quelques formes connues est du plus haut intérêt pour le pédagogue, qui avant d'essayer de corriger ces erreurs, pourrait au préalable en comprendre la logique"** [SER 91]. C'est en effet sur cette base que se fonde l'adaptation des programmes thérapeutiques aux apprenants quels qu'ils soient.

REFERENCES

[ABD 94] H. ABDI. *Les réseaux de neurones*. P.U.G. Grenoble, 1994.

[AHM 93] R. AHMED-OUAMER. *AGED I a Computer-Assisted Courseware Engineering for Industrial Applications*. Proceedings of the IEEE international Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 2. Le Touquet, France, 1993. Pp 540..545.

[ALB 73] M. L. ALBERT. *A simple test of visual neglect*. Neurology, n°23. 1973. Pp 658..664.

[ALL 91] L. ALLAL. *Vers une pratique de l'évaluation formative. Matériel de formation continue des enseignants*. De Boeck-Wesmael, Bruxelles, 1991.

[ALT 93] J. L. ALTY. *Multi-Media Interfaces in process Control. A Methodological Approach*. Proceedings of the IEEE international Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 1. Le Touquet, France, 1993. Pp 361..366.

[AND 85a] J. R. ANDERSON et B. J. REISER. *The LISP tutor*. Byte, n°10, vol.4, 1985. Pp 159..175.

[AND 85b] J. R. ANDERSON et al. *The GEOMETRY tutor*. Proceedings of the ninth IJCAI, Los Angeles 1985. Morgan Kaufmann, Los Altos, California, 1985. Pp 1..7.

[AND 85c] J. R. ANDERSON et al. *Intelligent Tutoring Systems*. Science, vol. 228, 1985. Pp 456..462.

[ATK 68] R. C. ATKINSON et R. M. SHIFFRIN. *Human memory : A proposed system and its control processes*. In K. W. Spence et J. T. Spence (Eds.), The psychology of learning and motivation : Advances in research and theory. Vol. 2. Academic Press, New york. 1968.

[AUD 85] M.-N. AUDIGIER et al. *Objectif calcul C.P.* Enseigner les mathématiques au cours préparatoire. Hatier, Paris, 1985.

[BADA 90] R. BADARD, T. BENSEBAA et P. PREVOT. *Réalisation d'un tuteur intelligent pour la formation industrielle*. Le Journal de la formation continue et de l'EAO. N°247, 10 Juin 1990. Pp 2..6.

[BAD 93] A. BADDELEY. *La mémoire humaine. Théorie et pratique*. P.U.G., Grenoble. 1993.

[BAN 69] A. BANDURA. *Principles of behavior modification*. Holt, Rinehart and Winston, New york, 1969.

[BAR 86] A. BARR et E. A. FEIGENBAUM. *Le manuel de l'Intelligence Artificielle*. Tome 1. Eyrolles, Paris, 1986.

[BARK 88] P. BARKER. *Expert systems in engineering education*. Engineering applications of Artificial Intelligence. Vol. 1, mars 1988. Pp 47..58.

[BARO 91] A. J. BAROODY. *Remédier aux difficultés courantes du comptage*. In J. Bideaud, C. Meljac, J.-P. Fischer (eds.), Les chemins du nombre. P.U.L. Lille. 1991. Pp 377..399.

[BAS 75] A. BASSO et al. *Etude contrôlée de la rééducation du langage dans l'aphasie : Comparaison entre aphasiques traités et non-traités*. Rev. Neurol. Vol. 131, n°9, 1975. Pp 607..614.

[BEA 86] M.-F. BEAUVOIS et J. DEROUESNE. *Recherche en neuropsychologie et rééducation : Quels rapports ?* In X. Seron et C. Laterre, Rééduquer le cerveau. Logopédie, psychologie, neurologie. Mardaga, Bruxelles, 1986. Pp 163..189.

[BEL 93] N. J. BELKIN , P. G. MARCHETTI et C. COOL. *Braque : design of an interface to support user interaction in information retrieval. Hypertext and information retrieval*. Information Processing and Management. Vol. 29, n° 3, 1993. Pp 325..344.

[BEN 69] D. F. BENSON et M. B. DENCKLA. *Verbal paraphasia as a source of calculation disturbance*. Archives of Neurology (Chicago). N°21. 1969. Pp 96..102.

[BENI 94] J. S. BENITEZ READ C. ABDALLAH et K. K. KUMBLA. *Adaptative nonlinear control for neutron power tracking in a research reactor*. In A. R. Kaylan, A. Lehman and T. I. Oren (Eds.), proceedings of the European Simulation Symposium. Vol. 2, October 9..12, 1994. Pp 195..199.

- [BERA 93] J. M. BERARD. *Ordinateur et système éducatif. 1993 : quelques questions. Dans Utilisation de l'ordinateur dans l'enseignement secondaire.* J.M. Bérard et al. Hachette education, Paris, 1993. Pp 115..130.
- [BERB 89] J. BERBAUM. *Apprentissage et formation.* 2^e édition. Que sais-je ?, P.U.F., Paris, 1989.
- [BER 80] R. S. BERNDT et A. CARAMAZZA. *A redefinition of the syndrome of Broca's aphasia : Implications for a neuropsychological model of language.* Applied Psycholinguistics. N°1, 1980. Pp225..278.
- [BES 92] M.-N. BESSAGNET et T. NODENOT. *L'AGDI. Des solutions pour rationaliser la production de logiciels éducatifs.* Génie éducatif. N°3, Mars 1992. Pp 11..18.
- [BID 80] J. BIDEAUD. *Nombre, sériation, inclusion : irrégularités du développement et perspectives de recherche.* Bulletin de psychologie. Vol. 33, n°345. 1980. Pp 659..665.
- [BIDE 85] R. BIDEAU. *Raison d'être d'un système-auteur en milieu scolaire.* Le Journal de la formation continue et de l'EAO. N°187, 10 Juin 1985. Pp 4..8.
- [BIL 92] E. BILANGE. *Dialogue personne-machine, modélisation et réalisation informatique.* Hermès, Paris, 1992.
- [BIR 90] A. BIREAUD. *Les méthodes pédagogiques de l'enseignement supérieur.* Les éditions d'organisation. Paris, 1990.
- [BOE 86] C. BOEHRINGER. *Rendements et séquelles neuropsychologiques : la remise au travail du patient cérébro-lésé.* In X. Seron et C. Laterre, Rééduquer le cerveau. Logopédie, psychologie, neurologie. Mardaga, Bruxelles, 1986. Pp 243..254.
- [BOG 93] J. BOGOUSLAVSKY, M.-G. BOUSSER et J.-L. MAS. *Accidents vasculaires cérébraux.* Doin, Paris, 1993.
- [BON 84] A. BONNET. *L'Intelligence Artificielle, promesses et réalités.* Interéditions, Paris, 1984
- [BOU 93] B. BOUCHON-MEUNIER. *La logique floue.* Que-sais-je, P.U.F., Paris, 1993.
- [BOUR 93] J. BOURGAIN. *Les médiathèques publiques comme lieu privilégié d'adaptation des nouvelles technologies de l'information aux besoins et pratiques des utilisateurs : le cas de la bibliothèque publique d'information.* In H. P. Geh and J. Davies (Eds.), Knowledge for Europe : librarians and publishers working together. European Conference, Brussels, 11..13 November 1992. K. G. Saur, München, 1993. Pp 44..54.
- [BOURS 94] P. BOURSIER et P.A. TAUFOR. *La technologie multimédia.* Hermès, Paris, 1994.
- [BOUT 85] J. P. BOUTINET. *Les passages obligés dans l'aménagement des situations d'apprentissage. Contribution à la méthodologie des apprentissages.* Le Journal de la formation continue et de l'EAO. N°192, 25 Oct 1985. Pp 3..7.
- [BRI 88] R. BRIAND. *Méthode de développement de Systèmes Experts.* Eyrolles, Paris, 1988.
- [BRIS 89] R. BRISSIAUD. *Comment les enfants apprennent à calculer. Au delà de Piaget et de la théorie des ensembles.* Retz, Paris. 1989.
- [BROU 80] G. BROUSSEAU. *Problèmes de l'enseignement des décimaux.* Recherches en didactique des mathématiques. Vol. 1, n°1, 1980. Pp 11..59.
- [BRO 82] J. S. BROWN, R. R. BURTON et J. De KLEER. *Pedagogical, natural language and knowledge engineering techniques in SOPHIE I, II, III.* In D. Sleeman and J.S. Brown (Eds.), Intelligent tutoring systems. Academic Press, New york, 1982. Pp 227..282.
- [BRUN 67] F. BRUNOT. *Histoire de la langue française des origines à nos jours.* Tome II. Le XVI^e siècle. Armand Colin, Paris, 1967.
- [BRU 86] R. BRUYER et al. *Le point de vue méthodologique.* In X. Seron et C. Laterre, Rééduquer le cerveau. Logopédie, psychologie, neurologie. Mardaga, Bruxelles, 1986. Pp 77..89.
- [BUR 82] R. R. BURTON et J. S. BROWN. *An investigation of computer coaching for informal learning activities.* In D. Sleeman and J.S. Brown (Eds.), Intelligent tutoring systems. Academic Press, New york, 1982. Pp 79..98.

- [BUT 86] **J. BUTTET** et **T. HIRSBRUNNER**. *Rééducation des aphasiques : le travail en groupes*. In X. Seron et C. Laterre, *Rééduquer le cerveau. Logopédie, psychologie, neurologie*. Mardaga, Bruxelles, 1986. Pp 157..160.
- [CAM 88] **J.I.D. CAMPBELL** et **J.M. CLARK**. *An encoding complex view of cognitive number processing : Comment on McCloskey, Sokol, and Goodman (1986)*. *Journal of experimental Psychology : General*, n°117. 1988. Pp 204..234.
- [CAR 70] **J.R. CARBONELL**. *AI in CAI : an artificial intelligence approach to computer-assisted instruction*. *IEEE transactions on Man-Machine Systems*, vol. n°11, n°4, 1970. Pp 190..202.
- [CAS 86] **P. CASTAIGNE**. *Préface*. In B. Ducarne de Ribaucourt, *Rééducation sémiologique de l'aphasie*. Masson, Paris, 1986.
- [CAS 93] **R. CASTANET**. *Réseau local, banques de données et représentations graphiques*. In J.M. Bérard et al., *Utilisation de l'ordinateur dans l'enseignement secondaire*. Hachette éducation, Paris, 1993. Pp 85..90.
- [CAZ 77] **P. CAZAYUS**. *L'aphasie du point de vue du psychologue*. Dessart et Mardaga, Bruxelles, 1977.
- [CHA 88] **G. CHAPOUTIER**. *Mémoire et cerveau. Biologie de l'apprentissage*. Rocher, Paris, 1988.
- [CHI 91] **M.H. CHILOUP-BEKAERT**. *Utilisation de la notion d'objets contraints pour lamodélisation et la simulation des systèmes de production*. Thèse de doctorat en Productique : Automatique et Informatique Industrielle. Université de Lille 1. 1991.
- [CHO 59] **N. CHOMSKY**. *Structures syntaxiques*. Le Seuil, Paris. 1959.
- [CHOU 88] **E. CHOURAQUI**. *ARCHIMEDE : An Intelligent Tutoring System for geometry*. In T. O'Shea and V. Sgurev (Eds.), *Proceedings of the third Conference on Artificial Intelligence, AIMS'A88*. Varna, Amsterdam, 1988. Pp 389..396.
- [CLA 83] **W.J. CLANCEY**. *GUIDON*. *Journal of Computer-based Instruction*, vol. 10, n° 1, 1983. Pp 8..14.
- [CLA 84] **W. J. CLANCEY** et **R. LETSINGER**. *NEOMYCIN : Reconfiguring a rule-based expert system for application to teaching*. *Proceedings of the seventh IJCAI*, 1984.
- [CLA 87] **W. J. CLANCEY**. *Methodology for building and Intelligent Tutoring System*. In G. Kearsley (Ed.), *Artificial Intelligence and Instruction. Application and methods*. Addison-Wesley, Menlo Park, California, 1987.
- [CLAR 91] **J.M. CLARK** et **J.I.D. CAMPBELL**. *Integrated versus modular theories of number skills and acalculia*. *Brain and Cognition*, n°17. 1991. Pp 204..239.
- [COH 91] **L. COHEN** et **S. DEHAENE**. *Neglect dyslexia for numbers ? A case report*. *Cognitive Neuropsychology*. N°8. 1991. Pp 39..58.
- [CON 85] **B. CONSTANTIN**. *Libertés conceptuelles et Enseignement Assisté par Ordinateur. Pour une responsabilisation des usagers*. *Le Journal de la formation continue et de l'EAO*. N°192, 25 Oct 1985. Pp 8..13.
- [COU 90] **J. COUTAZ**. *Interfaces Homme-Ordinateur*. Conception et réalisation. ordas, Paris, 1990.
- [DAH 86] **A. DAHAN-DALMEDICO** et **J. PEIFFER**. *Une histoire des mathématiques. Routes et dédales*. Editions du Seuil, Paris, 1986.
- [DAL 94] **P. J. DALIANIS** et **S.G. TZAFESTAS**. *An Investigation of the Application of Neural Networks to the Diagnosis of Chemical Engineering Processes*. *Proceedings of the IMACS - IEEE/SMC International SPRANN Conference*. Lille, France, 1994. Pp 45..48.
- [DAM 92] **A. DAMASIO** et **H. DAMASIO**. *Le cerveau et le langage*. *Pour la science*, n°181, Nov. 1992. Pp 80..87.
- [DAV 89] **E. DAVALO** et **P. NAIM**. *Des Réseaux de Neurones*. Eyrolles, Paris, 1989.
- [DAVID 89] **J.M. DAVID**, **J.P KRIVINE** et **R. SIMMONS**. *Préface*. 9e Journées internationales, Les systèmes experts et leurs applications. Avignon, 1989. Pp 5..7.
- [DED 86] **C. DEDE**. *A review and synthesis of recent research in intelligent computer-assisted instruction*. *Int. J. Man-Machine Studies*. Vol. 24, 1986. Pp 329..353.

- [DEH 91] S. DEHAENE et L. COHEN. *Two mental calculation systems : A case study of severe acalculia with preserved approximation*. *Neuropsychologia*, vol. 29, n°11. 1991. Pp 1045..1074.
- [DEH 92] S. DEHAENE. *Varieties of numerical abilities*. *Cognition*, n°44. 1992. Pp 1..42.
- [DELA 87] J. P. DELAHAYE. *Outils logiques pour l'Intelligence Artificielle*. Eyrolles, Paris, 1987.
- [DEL 82a] G. DELOCHE et X. SERON. *From one to 1 : An analysis of a transcoding process by means of neuropsychological data*. *Cognition*, n°12. 1982. Pp 119..149.
- [DEL 82b] G. DELOCHE et X. SERON. *From three to 3 : A differential analysis of skills in transcoding quantities between patients with Broca's and Wernicke's aphasia*. *Brain*, n°105. 1982. Pp 719..733.
- [DEL 85] G. DELOCHE et X. SERON. *Syntactical Knowledge in a case of Aggrammatism : evidence from Transcoding Roman and Arabic Numerals*. *Brain and Language*, n°25. 1985. Pp 234..245.
- [DEL 86] G. DELOCHE et X. SERON. *Grammaticality judgments by aphasics of alphabetically written numeral forms*. *Psychol. Belg.* vol. XXVI, n°1. 1986. Pp 17..42.
- [DEL 87a] G. DELOCHE et X. SERON. *Neuropsychologie du calcul : bref historique, approche cognitive et deux exemples de rééducation de l'écriture des nombres*. *L'orthophonie*. Actes scientifiques du congrès international de l'orthophonie de Nice. 1987. Pp 84..111.
- [DEL 87b] G. DELOCHE et X. SERON. *Numerical transcoding : A general production model*. In G.Deloche et X. Seron (Eds.), *Mathematical disabilities : A cognitive neuropsychological perspective*. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, New Jersey. 1987. Pp 137..170.
- [DEL 90] G. DELOCHE, D. HANNEQUIN et al. *Rééducation sur micro-ordinateur des troubles de la dénomination d'images chez les aphasiques adultes*. *Rééducation orthophonique*, vol. 28, n°163. Sept. 1990. Pp 299..313.
- [DEMA 86] F. DEMAIZIERE. *Enseignement Assisté par Ordinateur*. Ophrys, Paris, 1986.
- [DEM 94] J.-F. DEMONET et M. PUEL. *Aphasie et corrélats cérébraux des fonctions linguistiques*. In X. Seron et M. Jeannerod, *Neuropsychologie Humaine*. Mardaga, Liège, 1994. Pp 336..359.
- [De REN 78] E. De RENZI, P. FAGLIONI. *Normative data and screening power of a shortened version of the "token test"*. *Cortex*, 14. 1978. Pp 41-49.
- [DES 90] L. DESPREAUX. *La spirale d'apprentissage*. *Le journal de la formation continue et de l'E.A.O.* N°243. 10-Fév-1990. Pp 6..9.
- [DIA 88] B. DIAWARA. *Etude comparative des langages auteurs DUO, ARLEQUIN, et Dr. LEO*. *TSI*. Vol. 7, n°1, 1988. Pp 113..120.
- [DMO 94] Z. DMOCHOWSKI. *Project of simulation laboratory on electric power engineering*. In A. R. Kaylan, A. Lehman and T. I. Oren (Eds.), *proceedings of the European Simulation Symposium*. Vol. 1, October 9..12, 1994. Pp 199..201.
- [DOR 92] F. DORE et P. MERCIER. *Les fondements de l'apprentissage et de la cognition*. P.U.L. Morin, boucherville (Québec) 1992.
- [DRE 80] J. DREVILLON. *Pratiques éducatives et développement de la pensée opératoire*. P.U.F., Paris, 1980.
- [DRE 85] J. DREVILLON et al. *Fonctionnement cognitif et individualité*. Mardaga, Bruxelles, 1985.
- [DRO 78] R. DROZ et M. RAHMY. *Lire Piaget*. Mardaga, Bruxelles, 1978.
- [DUB 87] L. DUBE. *L'apprentissage*. *Le journal de la formation continue et de l'E.A.O.* N°217. 15-Oct-1987, pp2..13.
- [DUC 86] B. DUCARNE DE RIBAU COURT. *Rééducation sémiologique de l'aphasie*. Paris, Masson, 1986.
- [DUCR 90] J.J. DUCRET. *Jean Piaget*. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, 1990.
- [DUP 88] S. L. DUPUIS. *Les systèmes experts dans le champs de l'Intelligence Artificielle*. In *L'entreprise logistique*. *Intelligence Logistique et Systèmes Experts*. Cahier d'études et de recherches. Vol. 5, Hiver 1988-1989, Eurolog, Troyes. Pp 19..38.
- [DUR 69] C. DURIEU. *La rééducation des aphasiques*. Dessart, Bruxelles, 1969.

- [EC 301] *EC301 : Protocole de dépistage des troubles du calcul et du traitement des nombres*. De G. Deloche et X. Seron, édité par le Docteur. M.N. Metz-Lutz, Service de Neuropsychologie, Hospices civils de Strasbourg.
- [EIL 77] **R. EILLER** et coll. *Math et calcul C.P.*. Hachette, Paris, 1977.
- [EIL 81] **R. EILLER** et coll. *Math et calcul C.M.2*. Hachette, Paris, 1981.
- [FAR 87] **H. FARRENY** et **M. GHALLAB**. *Eléments d'Intelligence Artificielle*. Hermès, Paris, 1987.
- [FAR 89] **H. FARRENY**. *Les Systèmes Experts. Principes et exemples*. Cépadués éditions, Toulouse, 1989.
- [FAY 85] **M. FAYOL**. *Nombre, numération et dénombrement : que sait-on de leur acquisition ?* Revue française de pédagogie. N°70. 1985. Pp 59..77.
- [FEL 95] **M. FELLAHI** et **R. IKNI**. Constraints and Petri Nets in an Object Approach for Process Control Modelling and Simulation. Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference. Ottawa, Ontario, Canada. 24-26 July 1995.
- [FER 90] **I. FERRAND**, **G. DELOCHE** et **X. SERON**. *Les nombres en chiffres et en mots : rééducations expérimentales*. Rééducation Orthophonique. Vol. 28, n°163. 1990. Pp 341..357.
- [FEY 94] **P. FEYEREISEN** et **D. CORBETTA**. La gestualité intentionnelle. In X. Seron et M. Jeannerod, Neuropsychologie Humaine. Mardaga, Liège, 1994. Pp 235..254.
- [FIS 92] **G. FISCHBACH**. *Le cerveau et la pensée*. Pour la Science. N°181. Nov. 1992. Pp28..38.
- [FOR 89] **C. FORTIN** et **R. ROUSSEAU**. *Psychologie Cognitive. Une approche de traitement de l'information*. P.U.Q. / Télé-Université, Sainte-Foy, Québec, 1989.
- [FORT 85] **E. FORTE**. *Les langages auteur d'Enseignement Assisté par Ordinateur*. Laboratoire de micro-informatique de Lausanne, E.P.F.L.. Rapport n° FOR/ 851231. 1985.
- [FUS 91] **K. C. FUSON** et **Y. KWON**. *Systèmes de mots-nombres et autres outils culturels : effets sur les premiers calculs de l'enfant*. In J. Bideaud, C. Meljac, J.-P. Fischer (Eds.), Les chemins du Nombre. P.U.L. Lille. 1991. Pp 351..374.
- [GAR 89] **A. de la GARANDERIE**. *Défense et illustration de l'introspection. Au service de la gestion mentale*. Centurion, Paris, 1989.
- [GDR 94] **GDR-PRC, Communication Homme-Machine. GDR n°309. Rapport d'activité du GDR-PRC "CHM"**, Grenoble. 1994.
- [GEL 88] **G. GELBERT**. *Aphasies*. Rééducation Orthophonique, vol. 27, n°154, Juin 1988. Pp 161..178.
- [GLA 82] **G. GLAESER**. *La didactique expérimentale des mathématiques*. Bulletin n°332, APMEP, 1982.
- [GLAN 90] **S. A. GLANTZ** et **B. K. SLINKER**. *Primer of applied regression and analysis of variance*. McGraw Hill, New York. 1990.
- [GOD 93] **GODEFROID**. *Les fondements de la psychologie*. Editions vivantes, Laval (Québec), 1993.
- [GODE 95] **O. GODEFROY** et **M. ROUSSEAU**. *Divided and focused attention in patients with lesion of the prefrontal cortex*. Brain Cogn. 1995. A paraître.
- [GOL 77] **I. P. GOLSTEIN** et **B. CARR**. *The computer as coach : an athletic paradigm for intellectual education*. Proceedings of the Association for Computing Machinery Conference. Seattle. 1977. Pp 227..233.
- [GOO 72] **H. GOODGLASS** et **E. KAPLAN**. *The assessment of aphasia and related disorders*. Lea and Febiger, Philadelphia. 1972.
- [GOU 91] **G. GOUARDERES**. *Le génie éducatif : pour que l'arbre E.A.O. ne cache plus la forêt*. Génie éducatif, n°1, 1991. Pp 2..4.
- [GUY 87] **H. GUYARD**. *Le concept d'explication en aphasiologie*. Thèse d'Etat. Université de Rennes II, 1987.
- [GUY 87] **H. GUYARD**. *Le concept d'explication en aphasiologie*. Thèse d'Etat. Université de Rennes II, 1987.
- [GUY 90a] **H. GUYARD**, **V. MASSON** et **R. QUINIOU**. *Computer-based aphasia treatment meets artificial intelligence*. Aphasiology, vol. 4, n°6, 1990. Pp 599..613.

- [GUY 90b] H. GUYARD, V. MASSON et R. QUINIOU. *Introducing artificial intelligence into aphasiological data analysis : answers*. Aphasiology, vol. 4, n°6, 1990. Pp 631..635.
- [HAM 79] D. HAMELINE. *Les objectifs pédagogiques*. ESF, Paris, 1979.
- [HAN 84] D. HANNEQUIN et B. MIHOUT. *Les comportements d'autocorrection chez l'aphasique*. Rééducation Orthophonique. Vol. 22, n°137. Juin 1984.
- [HARD 94] A. d'HARDANCOURT. *Fou de PC*. Sybex, Paris, 1994.
- [HAR 73] J. R. HARTLEY et D. SLEEMAN. *Towards intelligent teaching systems*. International Journal of Man-Machine Studies, vol. 5, 1973. Pp 215..236.
- [HARM 87] P. HARMON. *Intelligent Job Aids : How AI Will Change Training in the Next Five Years*. In G. Kearsley (Ed.), Artificial Intelligence and Instruction. Application and methods. Addison-Wesley, Menlo Park, California, 1987.
- [HART 88] A. HART. *Acquisition du savoir pour les Systèmes Experts*. Masson, Paris, 1988.
- [HAT 91] J.P. HATON et al. *Le raisonnement en Intelligence Artificielle. Modèles, techniques et architectures pour les systèmes à bases de connaissances*. InterEditions, Paris, 1991.
- [HAT 92] M.C. HATON. *L'ordinateur "pédagogue"*. La Recherche, vol. 23, n° 246, 1992. Pp 1014..1022.
- [HEC 61] H. HECAEN, R. ANLERGUES et S. HOULLIER. *Les variétés cliniques des acalculies au cours des lésions rétrorolandiques : Approche statistique du problème*. Revue Neurologique. Vol. 105, n° 2. 1961. Pp 85..103.
- [HEC 72] H. HECAEN. *Introduction à la neuropsychologie*. Librairie Larousse, Paris, 1972.
- [HEN 19] S. E. HENSCHEN. *Über Sprach-, Musik- und Rechenmechanismen und ihre Lokalisation im Gehirn*. Zeitschrift für die Gesamte Neurologie und Psychiatrie, n°52. 1919. Pp 273..298.
- [HUB 77] W. HUBER. *Introduction à la psychologie de la personnalité*. Mardaga, Bruxelles 1977
- [HUR 75] J. R. HURFORD. *The linguistic theory of numerals*. Cambridge University Press, London. 1975.
- [IBR 90] B. IBRAHIM et al. *Courseware C.A.D. In A. McDougall and C. Dowling (Eds.), Computers in education*. Proceedings of the International Conference WCCE90, Sydney (Australia). Elsevier Science Publishers. North Holland, 1990. Pp 383..389.
- [IFR 81] G. IFRAH. *Histoire Universelle des chiffres*. Seghers, Paris, 1981.
- [JEA 94] M. JEANNEROD. *Le geste et l'action*. In X. Seron et M. Jeannerod, Neuropsychologie Humaine. Mardaga, Liège, 1994. Pp 217..234.
- [KAND 92] E. KANDEL, R. HAWKINS. *Les bases biologiques de l'apprentissage*. Pour la science, n°181, Novembre 1992, pp 70..78.
- [KAN 93] R. KANE et M. MILGRAM. *Extraction of Semantic rules from trained Multilayer Neural Networks*. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. San Francisco, California, 1993. Pp 1397..1401.
- [KAT 82] R. C. KATZ et V. T. NAGY. *A computerized treatment system for chronic aphasic patients*. In Brookshire (Ed.), Clinical Aphasia. B.R.K. publishers, Minneapolis. 1982.
- [KAT 87] R. C. KATZ. *Efficacy of aphasia treatment using microcomputers*. Aphasiology, vol. 1, n°2, 1987. Pp 141..149.
- [KEA 87a] G.P. KEARSLEY. *Preface*. In G. Kearsley (Ed.). Artificial Intelligence and Instruction.. Application and methods. Addison-Wesley, Menlo Park, California, 1987.
- [KEA 87b] G.P. KEARSLEY. *Overview*. In G. Kearsley (Ed.), Artificial Intelligence and Instruction. Application and methods. Addison-Wesley, Menlo Park, California, 1987. Pp 3..10
- [KOLB 84] D. KOLB. *Experiential learning experience as the source of learning and development*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall. 1984.

- [KOL 89] C. KOLSKI. *Contribution à l'ergonomie de conception des interfaces graphiques homme-machine dans les procédés industriels : Application au système expert SYNOP*. Thèse de doctorat en Automatique Industrielle et Humaine. Université de Valenciennes, 1989.
- [KOL 93] C. KOLSKI. *Ingénierie des interfaces homme-machine*. Hermès, Paris, 1993.
- [KOL 95] C. KOLSKI. *Méthodes et modèles de conception et d'évaluation des interfaces homme-machine*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrasis. 1995.
- [LAN 89] F. LANDRY. *La formation expérientielle : origines, définitions et tendances*. Education Permanente. N°100-101, 1989. Pp 13..22.
- [LAR 90] *Dictionnaire de la Psychologie*. Larousse, Paris 1990.
- [LAU 83] J.L. LAURIERE. *SNARK. Un moteur d'inférences pour Système Experts en logique du premier ordre*. Rapport de l'Institut de Programmation n°430, Nov. 1983.
- [LAU 88] J. L. LAURIERE. *Intelligence Artificielle. Représentation des connaissances*. Eyrolles, Paris, 1988.
- [LEC 79] A. R. LECOOURS, F. LHERMITTE et al. *L'APHASIE*. Flammarion, Paris, 1979.
- [LEC 82] A. R. LECOOURS et J.-L. NESPOULOUS. *Taxonomies des aphasies*. Recherches sémiotiques, vol. 1, n° 3, 1982. Pp 261..282.
- [LEC 84] A. R. LECOOURS, L. BRANCHEREAU et Y. JOANETTE. *La zone du langage et l'aphasie : enseignement standard et cas particuliers*. Meta-Cerveau, langage et traduction, vol. XXIX, n°1, 1984. Pp 10..26.
- [LE NY 92] J.F. LE NY. *Le conditionnement et l'apprentissage*. 7^e édition. P.U.F., Paris 1992.
- [LER 70] G. LERBERT. *Piaget*. Editions universitaires, Paris, 1970.
- [LEW 94] A. LEWIS. *The impact of simulation tools on the teaching of electronics design in universities*. In A. R. Kaylan, A. Lehman and T. I. Oren (Eds.), proceedings of the European Simulation Symposium. Vol. 1, October 9..12, 1994. Pp 184..187.
- [LHE 69] F. LHERMITTE, F. CHAIN, D. ARON, M. LEBLANC et O. SOUTY. *Les troubles de la vision des couleurs dans les lésions postérieures du cerveau à propos de 42 observations*. Revue Neurologique. Tome 121, n°1, Juillet 1969. Pp 5..29.
- [LHE 88]. F. LHERMITTE. *Préface. Rééducation de l'aphasique adulte*. A. Tissot. Masson, Paris, 1988.
- [LIE 90] A. LIEURY. *Manuel de psychologie générale*. Bordas, Paris, 1990.
- [LUC 93] J. LUCY. *Identifier les besoins des professeurs utilisateurs pour élaborer de nouveaux produits*. In J.M. Bérard et al., Utilisation de l'ordinateur dans l'enseignement secondaire. Hachette éducation, Paris, 1993. Pp 42..49.
- [McCAR 94] R. A. McCARTHY et E. K. WARRINGTON. *Neuropsychologie Cognitive. Une introduction clinique*. P.U.F. Paris, 1994.
- [McCL 85] M. McCLOSKEY, A. CARAMAZZA et A. BASILI. *Cognitive mechanisms in number processing and calculation : evidence from dyscalculia*. Brain and Cognition, n°4. 1985. Pp 171..196.
- [MAC 89] J.P. MACCHION. *Manuel utilisateur de LOIR*. Rapport interne IRIT, Toulouse, 1989.
- [McCL 87] M. McCLOSKEY et A. CARAMAZZA. *Cognitive Mechanisms in Normal and Impaired Number Processing*. In G. Deloche and X. Seron (Eds.), Mathematical disabilities : A cognitive neuropsychological perspective. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, New Jersey. 1987. Pp 201..219.
- [McCL 92] M. McCLOSKEY. *Cognitive mechanisms in numerical processing : evidence from acquired dyscalculia*. Cognition, n°44. 1992. Pp 107..157.
- [MAD 87] F. MADAULE et al. *Systèmes d'enseignement assisté par ordinateur : étude comparative*. TSI, vol. 6, n° 1, Dunod - Afcet. 1987 Pp 5-20.
- [MAL 92] J. L. MALANDIN *Un ordinateur peut-il aider un enseignant ?* In G.L. Baron and J. Baudé (Eds.). Actes du colloque "L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants". INRP, Paris. 1992 Pp 188-193

- [MAR 91] **G. MARTIN**, **M. MOSTEFAI** et **R. IKNI**. *A knowledge based Simulation System for Industrial Processes Control*. Proceedings of the 3rd Comadem International Conférence. Helt Southampton Institute. 2-4 July 1991. Pp 60..64.
- [MAS 88] **V. MASSON** et **R. QUINIOU**. *An expert system in aphasia : diagnosis and reeducation*. In demongeot, Herve, Rialle et Roche (Eds.), Artificial Intelligence and Cognitive Sciences. Manchester University Press, Manchester. 1988. Pp 347..360.
- [MAS 90] **V. MASSON**. *Modélisation par la synthèse de programmes, application à la rééducation des aphasiques*. Thèse de doctorat en Informatique. Université de Rennes I, 1990.
- [MAT 86] **J. MATHIEU**. *Psychologie Cognitive et Intelligence Artificielle*. In C. Bonnet et al. (Eds.), Psychologie, Intelligence Artificielle et Automatique. Mardaga, Bruxelles, 1986. Pp 19..36.
- [MAZ 84] **J.-M. MAZAUX**. *Aphasie*. R.P.A. N°71-72. 1984. Pp 253..270.
- [MEI 86] **P. MEIRIEU**. *Différencier la pédagogie. Pourquoi ? Comment?* CRDP de Lyon, 1986.
- [MEI 87] **P. MEIRIEU**. *Apprendre... oui, mais comment*. ESF, Paris, 1987.
- [MEN 70] **K. MENNINGER**. *Number Words and Number Symbols. A cultural History of Numbers*. The M.I.T. Press. Cambridge, Massachussets, and London, England. 1970.
- [MER 93] **J. F. MERLET** et al. *Toward a design method of a multimedia information system*. Proceedings of the IEEE international Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 4. Le Touquet, France, 1993. Pp 367..372.
- [MERR 90] **M. MERRI**. *Apport des travaux didactiques à la conception de produits d'EIAO*. Le Journal de la formation continue et de l'EAO. N°244, 10 Mars 1990. Pp 3..10.
- [MIA 91] **G. MIALARET**. *Pédagogie générale*. P.U.F. Paris, 1991.
- [MIE 92] **P. MIELE**. *Pour l'enseignant d'abord ?* In G.L. Baron and J. Baudé (Eds.). Actes du colloque "L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants". INRP, Paris, 1992. Pp 194-196.
- [MIL 56] **G. MILLER**. *The magical number seven, plus or minus two*. Psychological Review. N°63. 1956. Pp 81..97].
- [MILL 88] **P. MILLOT**. *Supervision des procédés automatisés et ergonomie*. Hermès, Paris, 1988.
- [MILN 86] **A. D. MILNER**. *Chronometric analysis in neuropsychology*. Neuropsychologia, vol. 24. 1986. Pp 115..128.
- [MON 94] **M. MONTAZERI** et al. *Simulation of non-linear one-dimensional modelling for surge prediction with the application of active surge control*. In A. R. Kaylan, A. Lehman and T. I. Oren (Eds.), proceedings of the European Simulation Symposium. Vol. 2, October 9..12, 1994. Pp 190..194.
- [MONT 64] **G. de MONTPELLIER**. *L'apprentissage*; in P. FRAISSE et J. PIAGET, traité de psychologie expérimentale, vol IV, P.U.F. Paris, 1964.
- [MOS 94] **M. MOSTEFAI**. *Un modèle d'architecture orienté objet pour la conception de plate-formes de simulation interactive*. Thèse de Doctorat en Productique : Automatique et Informatique Industrielle. Université de Lille I. 1994.
- [MOU 90] **J. MOUSTAFADIES**. *Formation au diagnostic technique L'apport de l'intelligence artificielle*. Masson, Paris, 1990.
- [MUC 87] **A. MUCCHIELLI**. *L'Enseignement par Ordinateur. Que sais-je?* P.U.F. Paris, 1987.
- [NAK 77] **R. NAKAMURA** et **R. TANIGUCHI**. *Reaction time in patients with cerebral hemiparesis*. Neuropsychologia, vol. 15. 1977. Pp 845..848.
- [NI 94] **J. NI** et al. *A simulation model to evaluate ammonia emission from pig house*. In A. R. Kaylan, A. Lehman and T. I. Oren (Eds.), proceedings of the European Simulation Symposium. Vol. 3, October 9..12, 1994. Pp 13..15.
- [NIC 85] **J.F. NICAUD**. *Systèmes experts en E.A.O*. Le journal de la formation continue et de l'E.A.O. N°185, 25 Avril 1985. Pp 9..11.

- [NIC 88] J.F. NICAUD et M. VIVET. *Les tuteurs intelligents : réalisations et tendances de recherche*. T.S.I. vol. 7, n°1, Dunod-Afcet, 1988, pp 21..45.
- [NIL 88] N. J. NILSON. *Principes d'Intelligence Artificielle*. Cepadues éditions, Toulouse, 1988.
- [NOR 86] D. A. NORMAN et T. SHALLICE. *Attention to action : Willed and automatic control of behaviour*. In R. J. Davidson, G. E. Schartz et D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self regulation*. Advances in research and theory, vol. 4. Plenum press, New york. 1986.
- [NOR 88] D. A. NORMAN. *The psychology of everyday things*. Basic Books, New York. 1988.
- [NWA 90] H. S. NWANA. *Intelligent tutoring systems : an overview*. Artificial Intelligence Review, n°4, 1990. Pp 251..277.
- [O'SH 84] T. O'SHEA et al. *Tools for creating intelligent computers tutors*. In A. Elithorn et R. Banerji (Eds.), *Artificial and Human Intelligence*. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, 1984. Pp 181..199.
- [PAP 80] S. PAPER. *LOGO : a Language for Learning*. N. J. : Creative Computing Press, Morrilton, 1980.
- [PAR 87] O. PARK et al. *Intelligent CAI : Old Wine in New Bottles, or a New Vintage ?*. In G. Kearsley (Ed.), *Artificial Intelligence and Instruction*. Application and methods. Addison-Wesley, Menlo Park, California, 1987. Pp 11..45
- [PARTZ 94] M.-P. PARTZ. *Rééducation et revalidation fonctionnelle*. In X. Seron et M. Jeannerod, *Neuropsychologie Humaine*. Mardaga, Liège, 1994. Pp 575..593.
- [PEL 92] M.-L. PELTIER et al. *C.E.I, objectif calcul. Cycle des apprentissages fondamentaux*. Hatier, Paris, 1992.
- [PER 88] J. C. PEREZ. *De nouvelles voies pour l'I.A*. Masson, Paris, 1988.
- [PER 92] P. PERRENOUD. *Différentiation de l'enseignement : résistances, deuils et paradoxes*. Cahiers Pédagogiques, n°306, sept. 1992. Pp 49..55.
- [PERR 94] M.-J. PERRIN-GLORIAN. *Théorie des situations didactiques : naissance, développement, perspectives*. In M. Artigue, R. Gras, C. Laborde, P. Tavignot (Eds.), *Vingt ans de didactique des mathématiques en France*. La Pensée sauvage, Paris, 1994. Pp 97..147.
- [PIA 67] J. PIAGET. *Biologie et connaissance*. Gallimard, Paris, 1967.
- [PIA 69] J. PIAGET. *Psychologie et pédagogie*. Denoël, Paris, 1969.
- [PIA 70] J. PIAGET. *L'épistémologie génétique*. Que sais-je? N°1399, P.U.F. 1970.
- [PIC 94] A. PICHON. *Dictez, c'est écrit. Système de dictée personnelle d'I.B.M.*. S.V.M. n°120. Oct. 1994.
- [PIT 92] J. PITRAT. *La symbiose entre l'intelligence artificielle et la science cognitive*. T.S.I., vol. 11, n°2, 1992. Pp 9..24.
- [PLA 69] E. PLANCHARD. *Introduction à la pédagogie*. Nauwelaerts, Louvain, Paris, 1969.
- [PON 82] D. PONJAERT, D. LAMICHE, C. LAROUBINE, J. TETARD. *Guide de conception et de réalisation*. Télétel, Paris, 1982.
- [POR 78] D. POROT. *Les troubles du langage*. Que sais-je ?, P.U.F., Paris, 1978.
- [POW 78] R. J. D. POWER et H. C. LONGUET-HIGGINS. *Learning to count : A computational model of language acquisition*. Proceedings of the royal Society, n°200. 1978. Pp 391..417.
- [PRE 92] P. PREVOT. *Un tuteur Intelligent pour la Formation Industrielle. Application à l'intégration d'un Didacticiel Cimentier*. Workshop de Thunder Bay. Mai 1992. Pp 20-39.
- [QUE 83] M. QUERE. *Langages d'auteurs d'hier et d'aujourd'hui*. Le journal de la formation continue et de l'E.A.O.. N°166. 25 sept. 1983. Pp 6..8.
- [QUE 91] M. QUERE et al. *Systèmes Experts et Enseignement Assisté par Ordinateur*. Ophrys, Paris, 1991.
- [RAT 91] S. A. RATHUS. *Psychologie générale*. Etudes vivantes. Montréal (Québec) 1991.
- [REU 77] M. REUHLIN. *Psychologie*. P U F. Paris 1977.

- [RIC 87] E. RICH. *Intelligence Artificielle*. Masson, Paris, 1987.
- [RICHA 90] J. F. RICHARD et al. *Traité de psychologie cognitive*. Vol n°2. Bordas, Paris, 1990.
- [RICH 84] N. RICHE. *Approche d'une analyse pédagogique*. Le journal de la formation continue et de l'E.A.O.. N° 177. 10 Oct. 1984. Pp 7..11.
- [RICHEL 66] M. RICHELLE. *Le conditionnement opérant*. Mardaga, Bruxelles 1966.
- [RON 93] D. RONXIN. *L'utilisation d'outils informatiques de calcul*. In J.M. Bérard et al., Utilisation de l'ordinateur dans l'enseignement secondaire. Hachette éducation, Paris, 1993. Pp 91..97.
- [ROS 89] I. ROSENFELD. *L'invention de la mémoire*. Le cerveau, nouvelles donnes. Eshel, Paris, 1989.
- [SAS 90] SAS Institute, Inc. *SAS users guide, statistics : version 6*. Cary, NC: SAS Institute. 1990.
- [SCA 86] D. SCAPIN. *Guide ergonomique de conception des interfaces homme-machine*. Rapport Technique I.N.R.I.A. n°77. Domaine de Voluceau, Rocquencourt. Oct. 1986.
- [SCH 86] E. SCHUSTER. *The role of native grammars in correcting errors in second language learning*. Comput. Intell. Vol. 2, 1986. Pp 93..98.
- [SEL 88] J. A. SELF. *Student models : what use are they?* In P. Ercoly and R. Lewis (Eds.), Artificial Intelligence Tools in education. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, 1988. Pp 73..86.
- [SER 79] X. SERON. *Aphasie et neuropsychologie*. Mardaga, Bruxelles, 1979.
- [SER 82a] X. SERON et P. FEYEREISEN. *Neurolinguistique*. In J. A. Rondal et X. Seron, Troubles du langage, diagnostic et rééducation. Mardaga, Bruxelles, 1982. Pp 131..165.
- [SER 82b] X. SERON. *La rééducation des aphasiques*. In J. A. Rondal et X. Seron, Troubles du langage, diagnostic et rééducation. Mardaga, Bruxelles, 1982. Pp 348..359.
- [SER 83c] X. SERON et G. DELOCHE. *From 4 to four : A supplement to « From three to 3 »*. Brain, n°106. 1983. Pp 735..744.
- [SER 84] X. SERON et G. DELOCHE. *From 2 to two : An analysis of of a transcoding process by means of neuropsychological evidence*. Journal of Psycholinguistic Research, n°13. 1984. Pp 215..235.
- [SER 86] X. SERON. *Les choix de stratégies : rétablir, réorganiser ou aménager l'environnement*. In X. Seron et C. Laterre, Rééduquer le cerveau. Logopédie, psychologie, neurologie. Mardaga, Bruxelles, 1986. Pp 63..76.
- [SER 91] X. SERON, G. DELOCHE et M.-P. NOEL. *Un transcodage des nombres chez l'enfant : la production des chiffres sous dictée*. In J. Bideaud, C. Meljac, J.-P. Fischer (Eds.), Les chemins du Nombre. P.U.L. Lille. 1991. Pp 303..327.
- [SER 93] X. SERON. *La neuropsychologie cognitive*. Que sais-je ? P.U.F. Paris. 1993.
- [SER 94a] X. SERON et M. JEANNEROD. *Préface*. In X. Seron et M. Jeannerod, Neuropsychologie Humaine. Mardaga, Liège, 1994. Pp 13..14.
- [SER 94b] X. SERON et G. DELOCHE. *Les troubles du calcul et du traitement des nombres*. In X. Seron et M. Jeannerod, Neuropsychologie Humaine. Mardaga, Liège, 1994. Pp 439..451.
- [SHO 76] E. H. SHORTLIFFE. *Computer-based Medical Consultations : Mycin*. American Elsevier Publishers, New York, 1976.
- [SIE 94] E. SIEROFF. *Les mécanismes attentionnels*. In X. Seron et M. Jeannerod, Neuropsychologie Humaine. Mardaga, Liège, 1994. Pp 127..151.
- [SER 79] X. SERON. *Aphasie et neuropsychologie*. Mardaga, Bruxelles, 1979.
- [SIM 80] J. C. SIMON. *L'éducation et l'informatisation de la société*. La documentation française, Paris, 1980.
- [SKI 58] B. F. SKINNER. *Teaching Machines*. Science, vol. 128, 1958. Pp 969..977.
- [SKI 69 a] B. F. SKINNER. *L'analyse expérimentale du comportement*. Mardaga, Bruxelles, 1969.
- [SKI 69b] B. F. SKINNER. *La révolution scientifique de l'enseignement*. Mardaga, Bruxelles, 1969.
- [SLE 82] D. SLEEMAN et J.S. BROWN. *Introduction*. In D. Sleeman and J.S. Brown (Eds.), Intelligent tutoring systems. Academic Press, New York, 1982. Pp 1..11.

- [SOM 89] **LEA SOMBE**. *Raisonnements sur des informations incomplètes en intelligence artificielle*. Teknea, Paris, 1989.
- [SOMM 88] **I. SOMMERVILLE**. *Le génie logiciel et ses applications*. Interéditions, Paris, 1988.
- [SOR 74] **B. SORIN**. *Analyse probabiliste des tests d'aptitude dits QCM*. APMEP, bulletin n°295, 1974. Pp 607..626.
- [TAS 92] **C. TASSO, D. FUM et P. GIANGRANDI**. *The Use of Explanation-Based Learning for Modelling Student Behavior in Foreign Language Tutoring*. In M. L; Swartz et M. Yazdani (Eds.), *Intelligent Tutoring Systems for Foreign Language Learning*. Springer-Verlag, Berlin. 1992. Pp 151..170.
- [TERK 90] **K. TERKI et al.** *An EITS Knowledge and Behaviour Model*. CATS'90. In E. Onate and al. (Eds.) CIMNE-Pineridge Press, Barcelona. 1990. Pp 573..578.
- [TER 87] **I. TERNON et C. MARTIGNY**. *Rééducations du transcodage des quantités chez l'aphasique. Mémoire d'orthophonie*. Académie de Paris, Université Paris VI, U.E.R. Pitié Salpétrière. 1987.
- [THI 86] **E. THIERY, E. DIETENS et H. VANDEREECKEN**. *La récupération spontanée : ampleur et limites*. In X. Seron et C. Laterre, *Rééduquer le cerveau*. Logopédie, psychologie, neurologie. Mardaga, Bruxelles, 1986. Pp 33..43.
- [THO 87] **P. W. THOMPSON**. *Mathematical Microworlds and Intelligent Computer-Assisted Instruction*. In G. Kearsley (Ed.), *Artificial Intelligence and Instruction. Application and methods*. Addison-Wesley, Menlo Park, California, 1987. Pp 83..109
- [TIB 94] **G. TIBERGHIE**. *La mémoire*. In X. Seron et M. Jeannerod, *Neuropsychologie Humaine*. Mardaga, Liège, 1994. Pp 255..316.
- [TIS 88] **A. TISSOT**. *Rééducation de l'aphasique adulte*. Masson, Paris, 1988. 3^e éd.
- [ULT 91a] **A. ULTSCH et al.** *Optimizing logical proofs with connectionist networks*. In Kohonen et al. (Eds.), *Artificial Neural Networks*, Elsevier, Science Publishers B.V. Amsterdam, 1991. Pp 585..590.
- [ULT 91b] **A. ULTSCH**. *The integration of Neuronal Networks with Expert Systems*. Proceedings on industrial applications of neural networks, Ascona. Vol. 3, Sept 1991. Pp 3..7.
- [VAL 87] **A. VALENTIN et R. LUCONGSANG**. *L'ergonomie des logiciels*. ANACT, Paris. Collection Outils et méthodes. 1987.
- [VALD 94] **S. VALDOIS et J.-L. NESPOULOUS**. *Perturbations du traitement phonétique et phonologique du langage*. In X. Seron et M. Jeannerod, *Neuropsychologie Humaine*. Mardaga, Liège, 1994. Pp 360..374.
- [VAN 87] **P. VAN EECKHOUT, F. HAMONET et C. FRANCOIS**. *L'aphasique et les partenaires de sa réadaptation*. Rééducation orthophonique, vol. 25, n° 152, 1987. Pp 425..441.
- [VANH 94] **C. VAN HOUCKE**. *Le multimédia en entreprise*. Hermès, Paris, 1994.
- [VANN 92] **J.-M. VANNOBEL et J.-M. TOULOTTE**. *An Expert System for Aphasia Treatment using Exercices concerning Alphabetically Written Numeral Forms*. Proceedings of the 14th International Conference of the I.E.E.E. E.M.B.S. Paris, 29 Oct.-1 Nov. 1992. Pp 922..923.
- [VANN 95] **J.-M. VANNOBEL, O. GODEFROY et J.-M. TOULOTTE**. *Assessment and training of brain damaged subjects in computerised tasks using graphical and interactive user interfaces*. Proceedings of the 8th Comadem International Conférence. Kingston, Ontario, Canada. 26-28 Juin 1995.
- [VER 92] **G. VERGNAUD**. *Approches didactiques en formation d'adultes*. Education Permanente. N°111, Juin 1992. Pp 19..31.
- [VIC 93] **B. VICKERY et A. VICKERY**. *Online search interface design*. Journal of documentation. Vol. 49, n°2, 1993. Pp 103..187.
- [WAG 91] **R.-L. WAGNER, J. PINCHON**. *Grammaire du Français classique et moderne*. Hachette, Paris, 1991.
- [WAL 87] **B. WAL**. *Development Strategies for ICAI on Small Computers*. In G. Kearsley (Ed.), *Artificial Intelligence and Instruction. Application and methods*. Addison-Wesley. Menlo Park. California. 1987. Pp 305..322

- [WAR 82] **E. K. WARRINGTON**. The fractionation of arithmetical skills : A single case study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. N°34A. 1982. Pp 31..51.
- [WEN 87] **E. WENGER**. *Artificial Intelligence and Tutoring Systems*. Morgan Kaufman Publishers, Los Altos, California, 1987.
- [WINN 90] **F. WINNYKAMEN**. *Apprendre en imitant*. P.U.F., Paris, 1990.
- [WIN 84] **P. H. WINSTON**. *Artificial Intelligence*. Addison-Wesley publishing company, inc, Reading, Massachussets, 1984.
- [WOL 92] **M. De WOLF et E. MILGROM**. *Tuteurs informatiques pour l'apprentissage de la programmation*. T.S.I. Vol. 11, n°6, 1992. Pp 9..37.
- [YAZ 86] **M. YAZDANI**. *Intelligent tutoring systems survey*. *Artificial Intelligence Review*, n°1, 1986. Pp 43..52.
- [YER 94] **S. YERALAN, B. TAN et S. TUFEKCI**. *The emulated flexible manufacturing laboratory*. In A. R. Kaylan, A. Lehman and T. I. Oren (Eds.), proceedings of the European Simulation Symposium. Vol. 1, October 9..12, 1994. Pp 196..198.

Annexe A

L'APPRENTISSAGE

A.1 Introduction

Quel que soit le public auquel on s'adresse : enfants, adultes, personnes handicapées, transmettre des connaissances c'est réaliser une interaction entre trois pôles incontournables : un apprenant, un savoir et une personne détenant ce savoir. Rationaliser la transmission des connaissances nécessite de se concentrer sur celui à qui doit profiter l'apprentissage : l'apprenant. C'est en cela apporter une réponse à deux questions intimement liées : comment celui-ci apprend-il ? et quelles méthodes faut-il employer pour effectuer efficacement un transfert de connaissances ?

Depuis plus d'un demi-siècle maintenant, les psychologues ont tenté d'apporter une réponse à la première question. A partir de l'étude comportementale de l'organisme (animal ou humain), on a d'abord tenté d'établir des lois générales de l'apprentissage, observables aussi bien chez l'animal que chez l'être humain. Plus récemment, les psychologues ont concentré leurs efforts sur l'aspect interne du processus d'apprentissage, soit sur les mécanismes internes du traitement de l'information.

La réponse à la deuxième question est apportée par la pédagogie dont le but est d'élaborer des méthodes pratiques d'enseignement efficaces, "d'apprendre à apprendre".

Ces principes pédagogiques généraux que nous détaillons dans les pages qui suivent se retrouvent également dans tout système d'enseignement assisté par ordinateur digne de ce nom.

La rééducation des personnes cérébro-lésées, et plus particulièrement la rééducation des troubles du langage, développe elle aussi des méthodes d'apprentissage (cf. chapitre I) qui s'inspirent des travaux effectués en neuropsychologie : stratégies de rétablissement, de réorganisation, etc. En ce qui concerne notamment les premières citées, le parallèle avec l'enseignement traditionnel est fortement souligné. D'ailleurs, beaucoup de méthodes employées par les orthophonistes utilisent du matériel et des méthodes pédagogiques scolaires adaptés en conséquence.

A.2 Qu'est ce que l'apprentissage ?

Il en existe différentes définitions selon la théorie de l'apprentissage sur laquelle se base son auteur. On peut classer ces théories en deux grandes écoles :

- le béhaviorisme, qui durant les années 1930 à 1955 qualifiée de période des "grandes théories de l'apprentissage" laissait croire que toutes les formes d'apprentissage se réduisaient à un très petit nombre de principes relevant de liaisons entre stimulus et réponse. Ces théories se basaient uniquement sur le comportement observable des individus [SKI 69b] :
 - l'apprentissage par action place l'accent sur la réponse,
 - l'apprentissage par expérience sur l'occasion dans laquelle la réponse survient,
 - l'apprentissage par essais et erreurs sur les conséquences de la réponse,
- le cognitivisme, qui trouve ses explications en termes de processus de traitement de l'information et de représentations en mémoire [LE NY 92].

Définitions :

- Pour Reuchlin [REU 77], "Il y a apprentissage lorsqu'un organisme, placé plusieurs fois dans la même *situation*, modifie sa *conduite* de façon systématique et relativement durable",
- la définition de de Montpellier est relativement similaire : "L'apprentissage consiste en une modification systématique de la *conduite* en cas de répétition d'une même *situation*" [MONT 64],
- George quant à lui [LAR 90] définit l'apprentissage de la façon suivante : "c'est chez un individu, une modification de sa capacité à réaliser une *tâche* sous l'effet de l'interaction avec son *environnement*. Ces interactions avec l'environnement peuvent être de différents types (expérience directe avec l'environnement, transmission)".

Ces trois premières définitions sont acceptables par les béhavioristes. Celles qui suivent, relèvent du cognitivisme.

- Doré et Mercier disent "qu'apprendre consiste à *acquérir des connaissances* ou à les modifier" [DOR 92],
- pour Richard et al. [RICHA 90], "il existe deux définitions usuelles de l'apprentissage : processus de modification des connaissances, ou de modification du comportement, au cours des interactions d'un organisme avec son environnement".

A.3 Apprentissage et mémoire

La mémoire est une forme de connaissance : celle du passé. Cependant, elle ne sert pas seulement à le réactiver, elle sert également à détecter la nouveauté et permettre ainsi l'apprentissage [RICHA 90]. Mémoire et apprentissage sont indissociables, il est nécessaire de conserver une trace de la situation pour qu'une modification systématique de la conduite intervienne [REU 77].

Voici quelques autres définitions du lien pouvant exister entre mémoire et apprentissage :

- suivant la définition de Lieury [LIE 90], "l'apprentissage est une modification systématique du comportement en fonction de l'expérience, tandis que le terme de *mémoire* désigne plutôt l'ensemble des *structures qui permettent ces modifications*",
- pour Reuchlin [REU 77], " la *mémoire* concerne, de façon plus limitative les mécanismes par lesquels un *apprentissage reste disponible* pendant un certain temps. Elle implique un processus de stockage et un processus de rappel",
- pour Kandel et Hawkins [KAND 92], l'apprentissage correspond à *l'acquisition de nouvelles connaissances*, et la *mémoire à la conservation des connaissances acquises...* L'apprentissage et la mémoire déterminent l'individualité de chacun de nous",
- "La plupart des effets des différentes parties du cerveau sur l'apprentissage sont indirects : les structures agissent sur des phénomènes liés à la mise en mémoire (attention, motivation), mais pas sur le phénomène mnésique lui même [CHA 88].

Il n'y a donc pas d'apprentissage possible sans mémoire. La répétition d'une même situation laisse une trace dans l'organisme : la mémoire rend possible l'existence de cette trace mnésique. La mémoire est un processus qui permet de stocker des nouvelles informations et de récupérer ces informations pour les utiliser au moment voulu.

A.4 Les théories de l'apprentissage

A.4.1 Les théories stimulus-réponse ou Béhaviorisme

A.4.1.1 Le béhaviorisme : une science

La psychologie du comportement ou béhaviorisme est née en Amérique avec John Watson qui introduisit le terme en 1913. Elle apparaissait comme une réaction contre la psychologie dominant jusqu'alors, orientée vers l'étude de la vie intérieure et fondée sur

l'examen intérieur de soi : l'*introspection*. L'objet pas plus que la méthode, ne pouvaient satisfaire aux exigences d'une connaissance scientifique par manque de pragmatisme et d'objectivité [DOR 92] : "Il n'y a pas de preuves basées sur des faits observables, le psychologue édifie son savoir en observant ses propres états d'âme" [LIE 90]. Bien que par l'effort d'A. Binet et des psychologues de Wurzburg, l'introspection allait tenter d'acquérir ses lettres de noblesse scientifique [GAR 89].

En faisant du comportement (behavior, en anglais) l'objet d'étude de la psychologie, Watson accomplissait une véritable rupture épistémologique : il donnait à la psychologie un objet susceptible d'observations, de manipulations et de mesures expérimentales lui conférant ainsi le statut de science. Sa définition du comportement, jusque dans ses excès est révélatrice de cette rupture (citée dans [GOD 93]) : "*Le comportement est l'ensemble des réactions objectivement observables qu'un organisme généralement pourvu d'un système nerveux oppose aux stimuli, eux aussi observables dans le milieu dans lequel il vit*".

Dès lors la tâche de la psychologie est rigoureusement déterminée : le stimulus étant donné, la psychologie doit prédire la réponse, ou inversement la réponse étant donnée la psychologie doit spécifier la nature du stimulus.

A.4.1.2 A un stimulus correspond une réponse

Cette théorie de l'apprentissage qualifiée de théorie Stimulus-Réponse (S-R) se base sur le fait que personne ne peut savoir ce qui se passe dans la tête de l'apprenant et le considère comme une "boîte noire". C'est à partir de l'observation de son comportement (englobant ses performances), et donc uniquement en recherchant les conditions externes avec lesquelles le comportement est lié, que l'on peut savoir si tel ou tel objectif est atteint. Les objectifs doivent donc être énoncés en termes de comportements observables : "Ce que fera l'élève pour prouver qu'il a atteint l'objectif fixé". Ainsi Dubé d'énoncer quelques principes du béhaviorisme : "Le comportement des organismes est dû à l'apprentissage et relativement peu à des caractères innés ; l'introspection n'est pas une méthode scientifique de recherche ; apprendre, c'est créer des liens entre le ou les stimuli de l'environnement et la réponse du sujet ; il y a relativement peu de différences entre les processus de comportement des différentes espèces" [DUB 87]. L'apprentissage étant le meilleur moyen de modifier le comportement, il devient la clé de voûte de la théorie béhavioriste.

A.4.1.3 Apprentissage et performance

La définition proposée par Watson ne permit pas d'aboutir à des résultats probants car réductrice à outrance. Par la suite, les psychologues béhavioristes se rendront compte que la performance ne dépend pas seulement de l'apprentissage, mais aussi d'autres facteurs relatifs à

l'état du sujet : **maturité, exercice antérieur, motivation, degré de vigilance, attention ou de fatigue**, intervenants sous la forme de variables intermédiaires entre la perception du stimulus et la réaction [LE NY 92].

A.4.1.4 Les conséquences d'une réponse

A.4.1.4.1 La loi de l'effet

Le comportement est fonction de ses conséquents. C'est ce que Thorndike appela la *loi de l'effet* dès la fin du siècle dernier [RAT 91]. Pour être complète, une description de l'interaction entre l'organisme et son milieu doit inclure l'action du milieu sur l'organisme après qu'une réponse a été produite [SKI 69 a]. En 1911, l'expérience de Thorndike à l'aide de sa "boîte à problèmes" dans laquelle un chat était enfermé et devait trouver la sortie par essais et erreurs lui permit d'analyser la relation temporelle entre le comportement et ses conséquences [GOD 93].

A.4.1.4.2 L'apprentissage par essais et erreurs

De même pour Hull (conditionnement instrumental), l'acquisition d'une connaissance nouvelle est basée sur ses conséquences et non pas sur ses antécédents. C'est le résultat d'une activité spontanée ou "par essais et erreurs" qui n'a pas été déterminée initialement par l'expérimentateur. Huber [HUB 77] rapporte une expérience de Hull visant à le conforter dans cette idée : "Lorsqu'un rat affamé est placé dans un labyrinthe, on voit qu'il répond au problème posé (trouver la nourriture) en cherchant, par *essais et erreurs*, l'allée qui l'y conduit et que parmi toutes les réponses faites par essais et erreurs, celles qui auront conduit à la nourriture auront plus de chances de se reproduire lorsque le rat sera remis dans le labyrinthe". Il s'agit là pour Hull, d'un état interne de stimulation (en l'occurrence la faim) qu'il appelle le *drive* [DOR 92] dont l'intensité diminue lorsque la réponse correcte est renforcée (nourriture). La théorie de Hull peut se résumer à : "Pour qu'il apprenne, un organisme doit avoir besoin de quelque chose (être excité par un stimulus interne ou externe), faire quelque chose (une réponse ou séquence de réponses) et obtenir quelque chose (faire l'expérience d'une réduction de motivation) [HUB 77].

A.4.1.5 Entre S et R, il y a un organisme

Hull est le premier behavioriste à admettre qu'il existe quelque chose entre S et R. Il propose le schéma S-O-R, dans lequel "O" désigne l'organisme. Il ne nie pas que l'organisme n'est pas observable, mais, précise qu'il doit être étudié en faisant des hypothèses. D'autre part, pour les apprentissages complexes (ex : apprentissage de labyrinthe par un rat), Hull propose un schéma Stimulus - Réponse plus général que le classique schéma S-R de Watson. Pour lui,

chaque carrefour du labyrinthe est un stimulus intermédiaire qui amène à une réponse intermédiaire (ex : tourner à droite). On obtient donc le schéma suivant : S - R - S - R - S - R..

A.4.1.6 Le conditionnement opérant

A.4.1.6.1 L'organisme ne subit pas, il agit

Parmi les personnes qui pensent également que le comportement ne doit pas être analysé et expliqué uniquement en termes de stimulus et de réponse comme le suggère Watson, mais en termes de relations existant entre des réponses de l'organisme et les contingences de renforcement du milieu se trouve B. F. Skinner. Il laisse (comme Hull et le conditionnement instrumental) une place plus grande à la spontanéité de l'organisme. Skinner est à l'origine du *conditionnement opérant* dans lequel "l'organisme ne subit pas, il agit" [RICHEL 66].

A.4.1.6.2 Le renforcement

Skinner aborde des phénomènes d'apprentissage plus complexes du côté de la réponse plutôt que du stimulus[HUB 77], en s'intéressant aux différentes formes de *renforcement*. Dès 1930, il fait des expériences avec des "boîtes de Skinner" dont la plus classique, rapportée ici par LE NY, concerne un animal enfermé dans une cage ("skinner-box") ne comportant qu'un abreuvoir rempli d'eau, une mangeoire et un levier. L'animal est affamé et laissé à lui-même. Il erre dans cette cage, et, dans le cours de cette activité désordonnée, il va lui arriver par hasard d'actionner le levier. Cela déclenche l'arrivée d'une boulette de nourriture dans la mangeoire. L'animal la mange puis erre à nouveau, et toujours par hasard appuie à nouveau sur le levier, ce qui délivre une nouvelle boulette. Un enregistrement (automatique) des activités de l'animal montrera que les intervalles entre deux pressions sur le levier diminuent jusqu'à ce que le rat appuie de façon répétée sur le levier, ne s'interrompant que pour manger la nourriture [LE NY 92].

Dans le conditionnement opérant ; comme nous venons de le voir dans l'exemple ci-dessus, les réponses correspondent à des stimuli déclencheurs (appui sur le levier) qui ne peuvent être associés à aucun stimulus défini : les réponses présentent ainsi une certaine spontanéité.

Dans ses recherches, Skinner mit l'accent sur le renforcement (récompense, réduction d'un besoin) lié non plus au stimulus mais à la réponse qu'il définit de façon purement comportementale. Skinner ne fit pas de rapprochement de la réponse avec le drive de Hull.

On peut ainsi selon lui, renforcer des réponses en les faisant suivre de stimuli agréables comme la nourriture, des louanges (renforcements positifs) voire de punitions (renforcements négatifs) [LIE 90].

L'apprentissage des réponses et des comportements complexes se fait par un processus d'approximations successives : le *shaping* (modelage), qui consiste à renforcer toute réponse, même imparfaite, du moment qu'elle s'approche de la réponse désirée [HUB 77]. Skinner s'en sert dans des situations d'apprentissage plus complexes à l'aide de pigeons. Il réussit ainsi à leur faire discriminer des couleurs, des formes géométriques, des cartes à jouer [LIE 90].

A.4.1.6.3 Programmes de renforcement Skinnériens

Les expériences menées par Skinner à l'aide de ses "skinner-box" se déroulaient automatiquement. Pour cela, il mit au point des machines réalisant de nombreux programmes de renforcement [REU 77, LIE 90, RAT 91] tels que :

- les programmes à proportion de renforcement fixe (FR : fixed ratio) où le renforcement intervient après un nombre déterminé de réponses (ex : après quatre appuis consécutifs),
- les programmes à proportion variable (VR : variable ratio) pour lesquels le renforcement a lieu après un nombre variable de réponses, variation qui s'effectue autour d'une moyenne de réponse,
- les programmes à intervalle fixe (FI : fixed interval). Le renforcement est ici donné un certain temps après la première réponse,
- les programmes à intervalle variable (VI : variable interval). Le renforcement a lieu après un temps variable autour d'une moyenne,
- les programmes à intervalle variable (DRL : differential reinforcement of low rates of responding) : le renforcement est attribué seulement après qu'un intervalle minimum sans réponse se soit écoulé depuis la réponse précédente. Tout appui anticipé faisant redémarrer le processus de renforcement à zéro.

A.4.1.6.4 L'enseignement programmé

En 1954, Skinner va plus loin en créant un type d'enseignement automatisé dans lequel l'homme n'intervient plus : *l'enseignement programmé* [SKI 58]. C'est un type d'enseignement fondé sur le découpage des apprentissages en une suite de séquences qui peuvent être répétées. Ces séquences permettent un contrôle systématique des connaissances de l'apprenant et sont susceptibles d'être traitées automatiquement. Les principes mis en oeuvre dans les machines à enseigner de Skinner sont simples et fondamentaux : nécessité de réponses nombreuses immédiatement renforcées, emploi de renforcements positifs lors de réponses correctes. Il n'y a pas de renforcements négatifs vis-à-vis des réponses fausses, celles-ci étant jugées improbables par le concepteur de ces machines. Une des caractéristiques essentielles de ces machines d'enseignement programmé est de *s'adapter* automatiquement

aux différences individuelles en matière de rapidité d'apprentissage [REU 77] et selon Skinner cette technique d'enseignement suscite une forte motivation chez l'élève.

Les principes généraux des programmes "skinnériens" sont les suivants [REU 77] : l'enseignement programmé se fonde sur une minutieuse analyse de chacune des tâches à enseigner. Dans les programmes skinnériens, la matière à enseigner (arithmétique, lecture, épellation entre autres [SKI 58]) est fragmentée en éléments de base s'enchaînant les uns à la suite des autres. Ces éléments sont classés des notions les plus simples aux plus complexes. Au départ, l'objectif de ces programmes n'est pas de fournir une structure de connaissances mais plutôt de faire en sorte que l'élève soit en mesure de donner la réponse correcte. Les renforcements qui suivent la réponse sont immédiats et nombreux. Cela implique que les questions doivent être brèves et simples afin que presque tous les élèves donnent la bonne réponse et en bénéficient. Néanmoins, en cas de mauvaise réponse, on donne des explications supplémentaires avant de réévaluer la même question. Idéalement, ces programmes qui sont longuement expérimentés avant d'être soumis aux élèves doivent se dérouler sans erreur de la part de l'apprenant.

A.4.1.7 Conclusion

Malgré son aspect réducteur qui doit permettre d'énoncer une théorie de l'apprentissage globale pouvant rendre compte de tous les apprentissages, des plus simples aux plus complexes, le béhaviorisme n'est donc pas dépourvu d'applications pédagogiques. Le privilège qu'il accorde au milieu, source des stimuli et à l'hérédité le conduit à concevoir l'apprentissage comme fondamental pour le comportement et à le fonder sur une théorie du conditionnement, à l'origine de l'enseignement programmé dont Skinner fut le pionnier.

Cependant, tous les partisans des théories S-R considèrent encore le sujet uniquement comme un organisme, voire comme un animal-machine. C'est un point de vue que ne partagent pas les cognitivistes qui s'intéressent au lien entre S et R, soit aux comportements internes (mentaux) de l'organisme.

A.4.2 Les théories cognitivistes

A.4.2.1 Présentation

Les théories cognitivistes concentrent leurs efforts sur les mécanismes mentaux, intervenant dans les activités de l'individu, qui peuvent être décomposés en étapes de traitement s'exécutant successivement (chaque étape réalise une fonction particulière) [FOR 89]. Elles privilégient le traitement de l'information chez l'individu [RICHA 90] relativement à la recherche des lois générales de la conduite animale et humaine [DRE 85]. Une description

des processus d'apprentissage doit tenir compte des processus mentaux qui interviennent entre le stimulus et la réponse (mémorisation, rappel, résolution de problèmes, prise de décision) [FOR 89, HUB 77] ainsi que des processus **d'attention, de rétention, de reproduction motrice, de motivation, de représentation des connaissances...** Elle ne peut se résumer à des lois générales que l'on retrouverait chez tous les individus de façon similaire [BAN 69]. Il est nécessaire de souligner la spécificité de l'individu dont il convient de distinguer la personnalité et l'individualité [DRE 85].

La psychologie de l'apprentissage, vue par le cognitiviste, analyse les processus sous-jacents à l'acquisition et à la modification des comportements : l'apprentissage est un processus cognitif [DOR 92]. Les domaines d'investigation de la psychologie cognitive concernent les fonctions cérébrales supérieures de traitement de l'information chez l'être humain (langage, cognition, mémoire...).

A.4.2.2 L'apprentissage latent

C'est par l'intermédiaire du behavioriste Edward Tolman que le "cognitif" prend place dans le giron des théories de l'apprentissage. Pour lui, le comportement est une réponse globale et non pas une séquence automatisée d'associations de type S - R établies par conditionnement [LIE 90]. L'apprentissage dépend des connaissances acquises par l'individu et ne se manifeste pas obligatoirement par un comportement observable. Il n'est non plus nécessaire d'avoir une réponse ou d'effectuer un renforcement pour qu'il y ait apprentissage. Tolman et Honzik l'ont montré dans une expérience réalisée en 1930 et décrite dans [REU 77] : deux groupes de rats furent lâchés dans un labyrinthe pendant dix jours. Lorsque les rats du premier groupe atteignaient le but, il recevaient systématiquement de la nourriture. Ce qui n'était pas le cas pour les rats du deuxième groupe, qui le parcoururent sans rien obtenir lorsqu'ils trouvaient la sortie. A partir du onzième jour, le deuxième groupe de rats obtint de la nourriture tout comme les autres. Tolman et Honzik observèrent que :

- les deux groupes apprenaient quelque chose durant les dix premiers jours, mais que l'apprentissage du groupe qui recevait de la nourriture était bien supérieur à celui de l'autre groupe,
- à partir du onzième jour, le nombre d'erreurs du deuxième groupe diminuait brusquement et fortement au point qu'à partir du douzième jour, il était inférieur à celui du premier groupe.

De ces observations, les auteurs conclurent que les rats du deuxième groupe avaient appris la représentation spatiale du labyrinthe et qu'ils avaient utilisé ce savoir lorsque cela leur permit d'obtenir une récompense [CHA 88].

Tolman et Honzik baptisèrent ce type d'apprentissage faisant intervenir des facteurs cognitifs du nom d'*apprentissage latent*, se proposant également de distinguer l'apprentissage de la performance, tout comme le firent trente ans plus tard Bandura et Walters (apprentissage vicariant).

A.4.2.3 L'apprentissage par imitation

Selon Winnykamen, "l'imitation désigne la correspondance entre le comportement de deux individus, lorsque cette correspondance résulte de la possibilité qu'a eu l'un des deux (celui qui imite) d'observer le comportement de l'autre (le modèle)". Il faut également y ajouter les mécanismes sous-jacents qui rendent cet appariement comportemental possible, ainsi que les conduites complexes partiellement imitatives. L'imitation constitue le mécanisme en oeuvre dans les apprentissages par observation [WINN 90]. C'est-à-dire que le sujet observe les moyens mis en oeuvre par le modèle avant d'en inférer la relation utile qu'il mettra lui-même en oeuvre. Miller et Dollard distinguent deux types d'apprentissage par imitation : le "matched dependant behavior" (le stimulus auquel répond un individu et qu'il imite est la réponse du modèle et cette imitation est directement suivie d'un renforcement) et le "copying" (imitation de comportements plus complexes comme des attitudes ou des façons de se comporter) [HUB 77]. Piaget remarqua que l'imitation se manifeste très précocement chez l'enfant et qu'elle se développe constamment durant les deux premières années de la vie lors du stade du développement sensori-moteur.

A.4.2.4 Les bases de la théorie piagétienne

Il ne saurait être question de parler d'apprentissage sans évoquer Jean Piaget et l'important travail qu'il a réalisé en psychologie du développement (psychologie de l'enfant). Il a introduit des concepts importants comme la notion de schème et la notion de stade de développement. La théorie piagétienne repose sur quatre domaines essentiels : l'épistémologie, la biologie, la logique et les mathématiques.

A.4.2.4.1 Les structures piagésiennes (schèmes)

Les structures sont des organisations d'actions coordonnées et intériorisées, d'où le primat de l'action dans le développement de l'intelligence : l'organisation de **schèmes** (structure ou organisation des actions telles qu'elles se transfèrent lors de la répétition de cette action en des circonstances semblables ou analogues) d'action va commander à la fois le développement de la représentation dans ses diverses manifestations et celui des opérations du sujet.

Les structures piagétienues sont des organisations cognitives qui se développent par le jeu fonctionnel des assimilations et des accommodations. Ces organisations ou systèmes prennent au cours du développement des "formes" qui deviennent semblables à celles qui seront utilisées par les logiciens et les mathématiciens.

Chaque étape du développement va correspondre à l'élaboration d'une structure. La fermeture d'une structure marquera la borne supérieure d'une étape de développement (ou encore d'un stade de développement) [DOR 92].

A.4.2.4.2 Les stades de développement chez l'enfant

D'après Piaget, le développement cognitif de l'enfant passe par quatre **stades** fonctions de son âge [PIA 70] se décomposant eux-mêmes en sous-stades :

- la période sensori-motrice (0 - 2 ans) qui comporte six sous-stades,
- la période préopératoire (2 - 7 ou 8 ans) qui comporte trois sous-stades,
- la période opératoire concrète (7 ou 8 - 11 ou 12 ans) qui comporte trois sous-stades,
- la période des structures opératoires formelles (14 - 16 ans).

Chacun de ces stades est défini par une structure d'ensemble caractérisant toutes les conduites nouvelles qui lui sont propres et un processus d'intégration tel que chaque structure est préparée par la précédente et s'intègre dans la suivante. Le développement intellectuel de l'enfant apparaît donc comme un processus continu.

A.4.2.4.3 Epistémologie, biologie, logique et mathématiques

A.4.2.4.3.1 L'épistémologie

L'épistémologie concerne l'étude de la connaissance en général avec comme questions principales :

- comment se forment nos connaissances ?
- comment s'accroissent-elles ?

L'objectif de Piaget était d'appréhender la genèse de la connaissance chez l'enfant. L'objet central et les interrogations première de l'épistémologie entendue dans ce sens est la connaissance, ou, comme il insistera, les différentes formes de connaissance, leur origine, leur valeur et la signification de leurs notions clé (véracité, nombre, espace, vie, conscience...) [DUCR 90].

A.4.2.4.3.2 La biologie

L'intelligence est une des formes prises par l'adaptation biologique durant la première année. Le fonctionnement intellectuel ne semble pas procéder par tâtonnements mais par une activité structurante impliquant à la fois des formes élaborées par l'enfant et un ajustement perpétuel de ces formes aux données de l'expérience [PIA 69]. L'intelligence s'inscrit dans le mouvement général de la vie à travers toutes les formes d'adaptation qu'elle a prises : "L'intelligence est l'adaptation par excellence" [PIA 67].

L'**adaptation cognitive** est un état d'équilibre entre l'**assimilation** et l'**accommodation**. L'assimilation consiste à intégrer un nouvel objet ou une nouvelle situation à l'ensemble des objets ou situations auxquels une conduite existante est déjà appliquée. L'accommodation est la modification de la conduite (structures existantes) afin d'y intégrer les modifications du milieu (nouvelles connaissances) [PIA 67].

S'il y a interaction entre ces deux processus, l'accommodation ne se produit qu'en vue d'une meilleure assimilation.

A.4.2.4.3.3 La logique et les mathématiques

Pour Piaget, l'explication de l'intelligence revient à mettre les opérations supérieures en continuité avec tout le développement, celui-ci étant conçu comme une évolution dirigée par les nécessités internes d'équilibre [PIA 67]. Ces opérations supérieures sont celles des logiciens et des mathématiciens. Autrement dit, le développement de l'intelligence sera celui d'organisations cognitives (ou de structures) qui seront de plus en plus proches des formes étudiées par la logique et les mathématiques. L'approche piagétienne du développement de l'intelligence est une approche structuraliste [LIE 90] dans la mesure où elle vise à appréhender les faits humains étudiés comme un ensemble d'éléments (structures) qui se déterminent les uns les autres. L'homme connaît par assimilation du milieu selon un schéma S - organisme organisant - R [LER 70].

A.4.2.5 Conclusion

L'approche de traitement de l'information repose sur un postulat fondamental : il est possible de décomposer les processus mentaux en étapes de traitement qui s'exécutent successivement. Il demeure que ces processus sont d'une très grande complexité. Ils sont par ailleurs très difficiles à décrire car il n'existe pas de fenêtre d'observation pour examiner directement leur opération et nécessitent de recourir à des méthodes indirectes sujettes à controverse [FOR 89].

Mais, connaître ces processus mentaux, c'est savoir ce qui se passe dans la tête de l'être humain. Cela permettrait aux pédagogues d'améliorer leurs techniques pédagogiques de façon adaptée à chaque apprenant. Cette connaissance revêt encore davantage d'importance en rééducation des troubles du langage. Connaître les processus mentaux qui interviennent dans une activité et savoir les discriminer par l'intermédiaires de tests spécifiques, c'est pouvoir déterminer avec exactitude la ou les fonction(s) touchées par le trouble, pouvoir réaliser un programme de rééducation adapté au patient et lui permettre de retrouver le maximum des capacités perdues après l'accident.

A.5 La pédagogie

A.5.1 Introduction

La pédagogie est l'art d'éduquer, de préparer et d'adapter l'individu au milieu social ambiant [PIA 69, PLA 69]. Elle est souvent confondue avec l'enseignement alors que la pédagogie désigne plus particulièrement sa pratique par la recherche et la mise en place de moyens pour assurer cet enseignement et le rendre efficace. La pédagogie se préoccupe soit de la transmission du savoir et des techniques culturelles par l'emploi de méthodes pédagogiques, soit "d'apprendre à apprendre", c'est-à-dire de faire connaître des algorithmes généraux pour la résolution de problèmes et pour l'acquisition de nouvelles connaissances.

La pédagogie est donc une "théorie pratique" qu'il est parfois difficile de distinguer de la didactique. Glaeser [GLA 82] propose la distinction suivante : "La pédagogie générale diffère de la didactique d'une discipline par le regard différent qu'elle jette sur les faits éducatifs. L'une cherche à dégager ce qu'il y a de commun à tous les apprentissages, l'autre s'intéresse à l'apprentissage d'un savoir bien précisé". La didactique suppose l'emploi de méthodes adaptées aux élèves, à la matière à enseigner et au type d'enseignement : cours, travaux dirigés, travaux pratiques. Elle suppose aussi le découpage des enseignements et une succession de leçons qui permette l'acquisition la plus rapide possible par le plus grand nombre possible d'apprenants (en situation scolaire de même qu'en formation professionnelle) [PERR 94].

D'une manière générale, l'acquisition d'une compétence est conditionnée par l'acquisition de plusieurs autres compétences, réputées plus simples ou plus élémentaires. Agir ainsi suppose de proposer d'abord les choses les plus accessibles aux apprenants, de programmer l'enseignement en "tranches de difficulté" et de modeler petit à petit le savoir de l'apprenant [SKI 69b].

A.5.2 Différencier les enseignements

A.5.2.1 La pédagogie différenciée

Toute situation pédagogique proposée ou imposée à un groupe d'élèves est inévitablement inadéquate pour une partie d'entre eux. Pour quelques uns, les activités proposées seront trop faciles ou triviales, pour d'autres, les tâches à réaliser ne seront pas comprises, hors de leur portée [VER 92].

Pour que son enseignement soit efficace et qu'il se concrétise par la réussite de ses élèves, le formateur doit également *différencier les méthodes d'apprentissage* qu'il emploie, savoir faire preuve de "flexibilité pédagogique" [DRE 80]. Différencier : "c'est organiser les interactions et les activités de sorte que chaque élève soit constamment ou du moins très souvent confronté aux situations didactiques les plus fécondes pour lui" [PERR 92].

La pédagogie différenciée est une stratégie de la réussite. Il faut convaincre les élèves en difficulté qu'ils peuvent apprendre, et pour cela les encourager et mettre en valeur leurs progrès. C'est parfois aussi les décourager en leur disant les difficultés qu'ils éprouvent et l'écart qui les sépare des apprenants "normaux" [PERR 92]. Pour parvenir à sortir ces élèves de l'échec scolaire, il convient d'individualiser et d'adapter les enseignements aux individus qui composent le groupe ou la classe.

A.5.2.2 Individualiser les apprentissages

L'individualisation des apprentissages permet à l'enseignant de prendre en compte les différences qui existent entre ses élèves (leur "profil pédagogique") dans le souci que l'acquisition des connaissances ait lieu pour l'ensemble du groupe malgré l'hétérogénéité de celui-ci [MEI 86]. Un retard dans le développement cognitif de l'élève peut en effet s'expliquer par un déphasage entre la stratégie utilisée préférentiellement par l'apprenant et les stratégies d'enseignement mises en œuvre autour de lui [MEI 87].

Une telle démarche doit aussi permettre à l'apprenant d'évaluer lui-même sa réussite au fur et à mesure de ses apprentissages.

Toutefois, si l'individualisation est nécessaire, elle doit cependant se faire sans exagération. L'individualisation à outrance appauvrit méthodologiquement l'élève et risque également de lui faire rejeter systématiquement toute nouvelle proposition.

Adapter l'enseignement aux stratégies d'apprentissage des individus n'est pas le déduire de celles-ci. C'est chercher ce qui peut varier dans son enseignement, l'assouplir de manière à ce que les sujets puissent utiliser leur stratégie d'apprentissage [MEI 87], évitant ainsi toute forme de dressage, de conditionnement externe [PLA 69].

A.5.2.3 Adapter l'enseignement aux élèves

L'adaptation de l'école aux élèves est un problème important. Outre le souci d'individualisation que nous venons de voir ci-dessus, il convient de différencier la façon d'enseigner et le contenu des enseignements en fonction du public auquel l'apprentissage est destiné. L'apprentissage chez l'enfant en est l'exemple le plus marquant. Les structures intellectuelles et morales de l'enfant sont différentes de celles de l'adulte, elles évoluent dans le temps : conception stadiste de Piaget. Chez l'enfant, le développement se fait en fonction d'une séquence de stades et non en référence à une chronologie ; son niveau scolaire se réfère à son âge psychogénétique (âge mental) et non pas à son âge chronologique (civil) [DRE 80].

Les méthodes d'éducation doivent donc s'efforcer de présenter aux enfants les matières de l'enseignement sous des formes assimilables à leur structure et aux différents stades de leur développement [PIA 69]. Il ne s'agit en aucun cas d'imaginer que l'enfant ne serait qu'un adulte ignorant, simplement dénué de connaissances et d'expérience.

Il en va de même lorsqu'il s'agit de faire une rééducation à un cérébro-lésé. La nature et la gravité de son trouble, sans compter entre autres, son milieu socioculturel et le niveau de connaissances qu'il avait avant le début du trouble sont autant de facteurs à prendre en compte lorsqu'il s'agit de lui établir un programme de rééducation. Dans ce cas de figure, le but n'est pas de permettre au patient de récupérer l'ensemble de ses facultés (si c'est le cas, tant mieux), mais de lui permettre de retrouver sa dignité dans la société, dans son environnement familial socioculturel et professionnel. Cet aspect de l'enseignement est détaillé dans le chapitre I.

A.5.3 Comment apprend-on?

A.5.3.1 Le rôle de l'acquis

Dans une situation d'apprentissage, les connaissances acquises (savoirs ou "compétences" et savoir-faire ou "capacités") de l'apprenant ont un rôle essentiel : "la mobilisation des acquis permet leur enrichissement" [MEI 87]. Les concepts d'assimilation et d'accommodation en insistant sur l'interdépendance de ces deux opérations développés par Piaget permettent de décrire le phénomène d'apprentissage [PIA 67]. L'adaptation est la mise en équilibre entre l'assimilation de l'expérience aux structures déductives et l'accommodation de ces structures aux données de l'expérience. A ce propos, Piaget [PIA 69] dit que : "D'une manière générale, l'adaptation suppose une interaction entre le sujet et l'objet, telle que le premier puisse s'incorporer le second tout en tenant compte de ses particularités, l'adaptation est d'autant plus poussée que cette assimilation et cette accommodation sont mieux différenciées et plus complémentaires".

Meirieu le rejoint à ce propos [MEI 87] : "On ne peut enseigner qu'en s'appuyant sur le sujet, ses acquis, les stratégies qui lui sont familières. L'enseignement est stérile s'il ne met pas

en place des situations d'apprentissage où l'apprenant puisse être en activité d'élaboration, c'est à dire d'intégration de données nouvelles à sa structure cognitive. Rien ne peut être acquis sans que l'apprenant l'articule à ce qu'il sait déjà. Rien ne peut être acquis en contournant ou neutralisant sa stratégie".

Une stratégie d'apprentissage comprend donc des opérations de *saisie de données* et des opérations de *traitement des données* qui ne peuvent être séparées, ni chronologiquement, ni logiquement, mais peuvent exister l'une sans l'autre.

A.5.3.2. Relation entre acquis et erreur [PERR 94]

Dans un apprentissage par adaptation, et notamment chez les enfants, le savoir est en voie de constitution, et cette constitution du savoir passe par des connaissances provisoires. L'erreur n'est alors pas seulement l'effet de l'ignorance, de l'incertitude ou du hasard, mais l'effet d'une connaissance antérieure qui avait son intérêt, ses succès mais qui maintenant se révèle fautive ou simplement inadaptée. Ces obstacles prévisibles par l'enseignant sont des vecteurs de modification des concepts produits par l'élève et de ses connaissances *provisoires*.

Pour Brousseau [BROU 80], les difficultés que rencontre l'élève sont même fondamentales pour provoquer cette modification des connaissances, modification qui intervient bien évidemment si l'erreur a été repérée. La nouvelle conception apparaît parce qu'elle est une solution à ces difficultés, on parle alors de progression par erreurs et succès [HAT 92].

A.5.3.3 Rôle des représentations mentales [GAR 82]

Pour De la Garanderie, l'apprentissage passe par trois gestes mentaux (l'attention, la réflexion et la mémorisation) qui se nourrissent des représentations mentales (images visuelles et/ou auditives) que conserve l'apprenant de ce qu'il est en train d'acquérir.

A.5.3.3.1 Le geste d'attention

Le geste d'attention est essentiel en situation d'apprentissage. Sans attention, aucune pédagogie n'est possible, même si on ressent de l'intérêt à ce que fait le formateur, qui peut d'ailleurs susciter l'intérêt et capter l'attention de ses élèves en donnant une forme attrayante à son enseignement.

Etre attentif, c'est **regarder, écouter**, puis pendant un moment de repos, **replonger les éléments auxquels on a prêté attention dans sa conscience en les évoquant** : on fait alors

exister mentalement par une succession d'images visuelles (auditives) reproductrices, les gestes qu'on a aperçus (les sons qu'on a entendus).

Notons au passage qu'il existe une différence entre l'objet visuel et l'objet auditif d'attention. L'objet visuel peut se trouver écrit au tableau ou dans un livre, ce qui permet d'y revenir pour préciser l'image mentale associée, alors que le son disparaît après écoute. Pour combler ce handicap, l'enseignant pourra revenir si besoin est sur les points importants de ce qu'il explique par sa seule parole, en réutilisant les mêmes mots.

A.5.3.3.2 Le geste de réflexion

Le geste de réflexion est plus complexe que le seul fait d'évoquer mentalement les images visuelles ou auditives d'une chose perçue. Réfléchir, c'est non seulement évoquer une représentation mentale, mais aussi faire retour à une loi, à une règle pour apporter la solution au problème présenté. Par exemple, quand on veut réaliser une action dont on a déjà été le témoin visuel, on revoit cette situation que le cerveau a enregistré comme un film en une succession d'images mentales qui représentent les gestes qui ont alors été effectués. Résoudre le problème, c'est donc visionner ce film, revoir ces gestes, y réfléchir et les appliquer.

A.5.3.3.3 Le geste de mémorisation

Conserver une situation sous formes d'images mentales par le geste d'attention, c'est déjà effectuer un geste de mémorisation, mais le geste d'attention n'est pas en situation d'être privé de l'objet, celui-ci est toujours présent à l'esprit et disponible.

Au contraire, avec l'acte de mémorisation, l'objet n'est plus directement perceptible, il doit être retrouvé mentalement : "L'acte d'attention est le passage à l'existence mentale en la présence de l'objet perçu, alors que le projet de mémorisation est le passage à l'existence mentale en l'absence de l'objet perçu".

Il a toutefois d'abord fallu que l'attention fasse exister mentalement les objets perçus pour que la mémoire puisse en disposer. La mémoire suppose donc l'acquis antérieur de l'attention.

A.5.4 Méthodes pédagogiques

A.5.4.1 Les composantes d'une méthode pédagogique

Une méthode pédagogique définit le mode de gestion de trois données, de nature fort différente, mais qui sont toujours présentes dès qu'il y a apprentissage organisé [MEI 86] :

- le formateur (ou son substitut : ordinateur, fiche, etc...),
- l'apprenant (ou le groupe d'apprenants),
- le savoir (savoir-faire, notion, concept...).



Une méthode pédagogique est un mélange de ces éléments qu'il convient de savoir doser et ne peut en aucun cas se réduire à la simple transmission d'un savoir par le discours d'un maître à des élèves qui boivent ses paroles. Car si être attentif, lire et écouter sont des signes manifestant que l'élève est en situation d'apprentissage, ce n'est pas suffisant pour dire que l'apprentissage s'effectue bien [MEI 87]. Il est nécessaire au formateur d'avoir un *retour d'informations* (feed-back) [DRO 78] provenant des élèves afin qu'il puisse contrôler la transmission de son savoir et le bien fondé de ses objectifs pédagogiques. Ce feed-back est aussi le moyen de rendre l'élève actif.

A.5.4.2 Exemples de méthodes pédagogiques

A.5.4.2.1 Présentation

Une méthode pédagogique intègre les trois éléments cités ci-dessus à des degrés différents, mais de façon complémentaire. Elle peut être vue comme l'articulation des savoirs mis en oeuvre, la manière dont l'élève les accapare et les moyens mis en oeuvre pour procéder à l'apprentissage.

Quelque soit la méthode utilisée, il faut avant tout qu'elle soit accordée aux objectifs visés et il convient de s'interroger sur l'opportunité de son emploi en fonction des connaissances et savoir-faire que l'on souhaite faire acquérir. Une méthode pédagogique s'exprime donc en termes d'*outil* et de *situation* [MEI 86] à utiliser en fonction des besoins et des ressources de l'élève, ses besoins étant comblés en s'appuyant sur ses ressources. Elle tente de concilier un objectif, un programme d'enseignement visant à atteindre cet objectif et des contraintes liées au public concerné (enfants, adolescents, adultes) [PIA 69].

A.5.4.2.2 L'apprentissage par expérience

Il y a deux manières d'apprendre par expérience, la première découle du béhaviorisme, la deuxième du cognitivisme :

- par essais et erreurs (méthode empirique). L'apprentissage serait un processus qui se déroulerait sans l'intervention de la volonté, sans qu'interviennent les caractéristiques de personnalité de l'apprenant,
- de façon expérimentale (expérience réflexive). L'expérience réflexive consiste essentiellement à expérimenter des idées non pas en tentant sa chance, mais en suivant les règles de la démarche scientifique adoptée. L'expérience réflexive accorde une place à la représentation mentale, à la compréhension de la situation.

A.5.4.2.2.1 L'apprentissage par essais et erreurs

L'apprentissage par essais et erreurs a ses racines dans le courant béhavioriste. Un animal subissant un tel apprentissage trouve la solution du problème qu'on lui pose généralement au hasard après un certain nombre d'échecs répétés (cf. A.4.1.4.2). Lorsqu'on lui soumet à nouveau ce même problème, on constate qu'il trouve de plus en plus vite la solution. Si on apprécie l'apprentissage en relevant pour chaque essai le nombre d'erreurs commises, ce nombre diminue. On peut dire qu'il y a un apprentissage progressif sans prise de conscience qui suppose plusieurs essais, les erreurs permettant progressivement de sélectionner la bonne réponse (loi de l'effet cf. A.4.1.4.1). La répétition du comportement est à l'origine de la réussite, d'autant plus rapidement qu'elle est renforcée (cf. A.4.1.6.2).

Chez l'homme, l'information concernant la qualité de la réponse (ex : juste, faux) n'est pas seule en cause dans l'apprentissage. Aussi selon que l'apprenant sait ou non qu'il s'agit d'une tâche qu'il va à nouveau rencontrer, les remarques "bien" ou "mal" permettent un apprentissage plus ou moins rapide. [BERB 89].

A.5.4.2.2.2 La pédagogie expérientielle

La pédagogie expérientielle place l'expérience au coeur du développement de l'apprenant et notamment dans le développement de l'enfant. Le raisonnement lui permettant ensuite d'intégrer les données brutes issues de l'expérience. Par ailleurs, la démarche expérimentale met l'accent sur l'interaction constante entre l'expérience contrôlée et le corpus théorique en voie de développement, sur le **contact direct** entre l'élève et le phénomène sous étude et la possibilité pour l'élève d'**agir** sur ce phénomène, de mettre en pratique le fruit de ses réflexions. C'est une démarche de connaissance lucide et intentionnelle, continue et progressive qui associe étroitement la pensée et l'action : "l'action nourrit la réflexion et la réflexion guide l'action" [LAN 89].

Le processus de pédagogie expérientielle est très similaire au processus d'adaptation décrit par Piaget en psychologie cognitive du développement [PIA 67] et comprend quatre étapes (cf. Fig. A.1) :

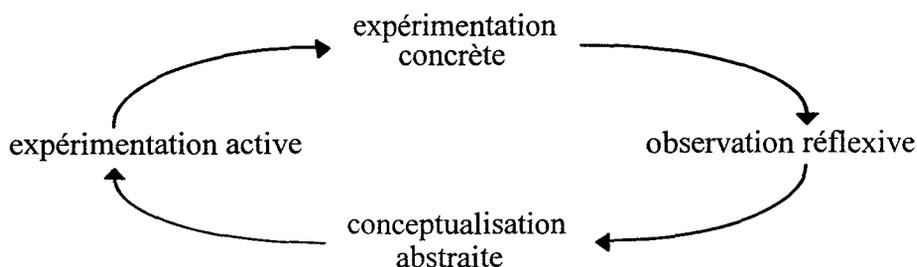


Figure A.1 : les quatre étapes en formation expérientielle. D'après Kolb [KOLB 84].

Ces quatre étapes se déroulent ainsi [LAN 89] :

- *expérimentation concrète* : l'apprenant est placé dans une situation où il est en contact direct avec un ou des phénomènes et où il doit faire quelque chose,
- *observation réflexive* : la situation évoquée ci-dessus comporte des éléments et problématiques nouveaux qui nécessitent des ajustements. L'apprenant prend un temps d'arrêt, analyse les éléments de la situation en cours, les compare aux données recueillies lors d'expériences antérieures et aux éléments d'information dont il dispose,
- *conceptualisation abstraite* : l'apprenant doit ensuite découvrir les concepts et les principes généraux lui permettant d'intégrer ses propres données (observations et réflexions) et dans certains cas de les comparer et de les intégrer au corpus de connaissances scientifiques approprié,
- *expérimentation active* : les résultats des étapes précédentes sont réinvestis dans l'action, ce qui permet de vérifier si les idées s'ancrent dans la réalité, si les solutions trouvées sont efficaces et si les éléments théoriques se vérifient dans la pratique.

Si l'apprenant parcourt ce cycle plusieurs fois, à chaque nouveau cycle il y a un élargissement du champ des connaissances et des capacités. Le point de départ est donc enrichi à chaque fois par des apports nouveaux, le cycle devient alors une "spirale d'apprentissage" [DES 90].

A.5.4.2.3 L'apprentissage socratique

L'apprentissage socratique est une stratégie ascendante (*bottom up*) qui consiste en l'étude de cas spécifiques à partir desquels on tire des généralisations. C'est en quelque sorte favoriser l'apprentissage de connaissances complexes à partir de connaissances élémentaires.

L'apprentissage socratique se base aussi sur le concept d'erreur constructive : on aide l'élève à trouver lui même sa faute en utilisant des exemples ou des contre-exemples. Il s'agit pour cela de savoir doser ces deux principes :

- ne pas laisser l'élève persister dans l'erreur, et donc l'aider,
- laisser la possibilité à l'élève de découvrir lui même son erreur, et donc ne pas trop l'aider.

A.5.4.2.4 La pédagogie par objectifs (P.P.O.)

La pédagogie par objectifs n'est pas une pédagogie, en ce sens qu'elle ne construit pas une théorie sur la façon d'instruire. C'est pourquoi Hameline lui préfère le terme de

technologie des objectifs [HAM 79]. La P.P.O. est une méthode pratique où l'enseignant explicite ses objectifs d'apprentissage (donc connus de l'apprenant), les mets en oeuvre individuellement et les accompagne de la description des instruments pratiques utilisés pour leur formulation, puis pour leur évaluation objective et rigoureuse [MIA 91]. La P.P.O. place l'accent sur deux notions centrales : la **définition des objectifs** et l'**évaluation des apprenants** [BIR 90].

Hameline et Allal [ALL 91] décrivent les principales qualités vers lesquelles doit tendre une telle intention pédagogique :

- le programme et la progression doivent être bâtis autour de l'activité de l'apprenant,
- l'énoncé de l'objectif doit être clair, spécifique et détaillé,
- il faut articuler les tâches des apprenants sur des objectifs sans cesse approfondis,
- l'activité de l'apprenant doit être identifiable par un comportement : il faut indiquer le niveau d'exigence auquel doit se situer l'apprentissage ainsi que les critères qui serviront à en faire l'évaluation. La P.P.O. est une base rationnelle pour l'évaluation formative (cf. A.5.5.2) et permet l'autoformation, un auto-contrôle de la progression sans les rigidités de l'enseignement programmé,
- Il faut donner à l'élève en difficulté la possibilité de reprendre tout ou partie de ce qui lui pose problème. Ce feed-back (avec ou sans soutien) devant lui permettre d'atteindre l'objectif visé.

Un des aspects de la pédagogie par objectifs est, à chaque étape d'une démarche déterminée par le formateur, d'isoler l'objectif nouveau à atteindre, de le démarquer des précédents et surtout, de le dégager des pré-requis émaillant traditionnellement l'enseignement. Cela permet de réaliser des micro-situations indépendantes les unes des autres, réalisables individuellement (chacun sachant de la sorte où il doit aller et par quelles étapes il lui faut passer) et à l'issue desquelles la question que se pose le formateur est : "l'objectif est-il atteint?" [MIA 91].

Tenant compte de ceci et du fait qu'en leur laissant suffisamment de temps, la majorité des élèves doivent être en mesure de satisfaire les objectifs.

Cette méthode basée plus particulièrement sur la pratique que sur la théorie convient bien à des formations professionnelles où l'activité technique à apprendre peut être relativement décomposable en éléments distincts. On peut cependant lui reprocher de ramener l'éducation à une mécanisation excluant toute initiative de la part de l'apprenant déviant de la méthode choisie par le formateur.

A.5.5 L'évaluation des apprenants [ALL 91]

A.5.5.1 L'évaluation sommative

L'évaluation sommative a pour but d'établir un bilan de ce que l'élève a appris. Ce type d'évaluation est généralement :

- *global*. L'évaluation sommative ne permet pas en général de faire l'évaluation de points bien spécifiques du programme. Elle porte sur un ensemble de connaissances,
- *lacunaire*. L'interrogation, le devoir surveillé ou l'examen portent sur une partie du programme auquel ils se rattachent. Des parties entières peuvent être ignorées ou mal interprétées par les élèves sans que l'évaluation ne permette de les repérer,
- *tardif*. Elle a lieu à la fin d'un cours, à la fin d'un programme ou d'une année scolaire. Il est donc difficile dans ces conditions de remédier aux problèmes d'apprentissage après coup. D'autant que le problème initial peut avoir des répercussions sur l'assimilation de la suite du programme.

A.5.5.2 L'évaluation formative

L'évaluation formative fournit au maître et/ou à l'élève des informations qui permettent de repérer les problèmes d'apprentissage, de formation et d'accorder une fonction formative à l'évaluation.

Les informations recueillies permettent d'adapter les activités d'apprentissage par l'intermédiaire d'une régulation immédiate ou différée (rétroactive ou proactive).

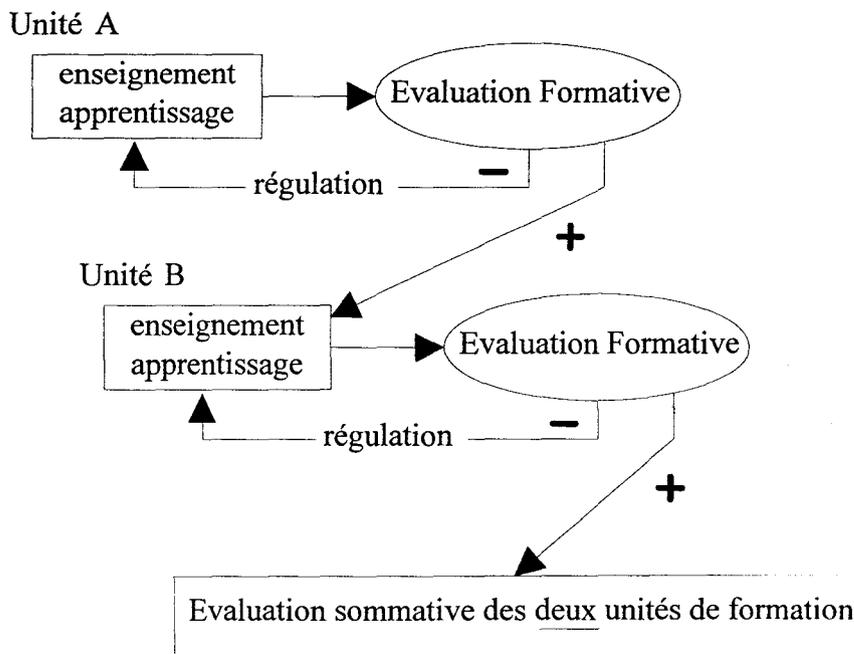


Figure A.2 : Evaluation formative puis évaluation sommative.

L'évaluation formative n'a pas lieu en fin de programme mais pendant la période de temps consacrée à une unité de formation (éventuellement au début d'une unité). On vise ainsi non pas à évaluer un échantillon représentatif des objectifs du cours, mais chaque objectif important de l'unité.

L'évaluation formative est un complément à l'évaluation sommative. Elle peut soit préparer l'évaluation sommative, soit se greffer sur elle.

A.5.5.3 Evaluation formative préparant l'évaluation sommative

Chacune des unités de formation (chapitre, activités) comporte une évaluation formative qui permet un retour sur les apprentissages non maîtrisés (cf. Fig. A.2). Dans cet exemple comprenant deux unités d'apprentissage A et B, si l'évaluation qui suit les apprentissages de l'unité A montre une maîtrise (+), l'élève passe à l'unité suivante (B), sinon (-) il entreprend des activités de régulation.

Les élèves sont ainsi préparés très systématiquement à passer une évaluation sommative sur les objectifs des unités considérées (A et B).

A.5.5.4 Evaluation formative greffée sur une évaluation sommative

Il est souvent difficile de prévoir pour chaque unité de formation une évaluation formative qui prépare tous les élèves à une réussite maximale de l'évaluation sommative. Plutôt que de renoncer à l'évaluation formative, il vaut mieux tenter d'insérer des activités de régulation à la suite d'un contrôle effectué d'abord dans une optique sommative (cf. Fig. A.3). Les régulations formatives "greffées" sur le contrôle peuvent impliquer un retour aux objectifs non maîtrisés de l'unité de formation A, mais elles peuvent aussi se situer dans la différenciation des activités d'enseignement / formation abordées dans l'unité suivante (B).

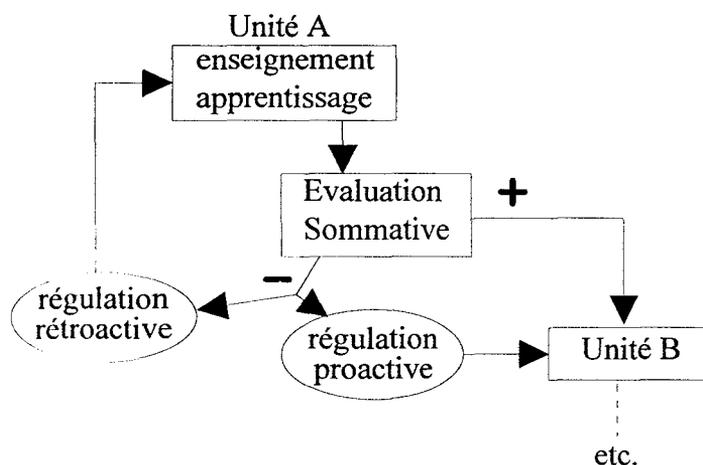


Figure A.3 : Evaluation sommative / formative.

A.5.6 Conclusion

Quelle que soit la méthode pédagogique utilisée, il faut que chaque apprenant puisse apprendre et retenir quelque chose. Pour remédier à l'échec scolaire il faut adapter l'enseignement à l'élève aussi bien dans son contenu que dans sa façon d'enseigner. Cela veut donc dire qu'il est souhaitable que l'enseignant soit en mesure d'utiliser plusieurs méthodes pédagogiques, qu'il soit capable d'énoncer différemment les mêmes choses et de rendre son enseignement intéressant. Susciter l'intérêt des élèves peut se faire par l'intermédiaire de moyens et de techniques d'enseignement attrayants, en donnant un rôle actif aux élèves dans le but de les motiver et de les encourager à vouloir en savoir davantage.

A.6 Conclusion de l'Annexe A

Automatiser l'apprentissage, ce rêve cher à Skinner qui avait abouti à l'époque à la conception de machines à enseigner est plus complexe qu'il n'y paraît. L'enseignement programmé a donné le jour à l'enseignement assisté par ordinateur (E.A.O.) qui, lorsqu'il intègre des outils d'intelligence artificielle devient E.I.A.O.

La transmission des connaissances est l'un des problèmes de base de tout système d'enseignement : ce n'est pas la solution qui intéresse un apprenant en phase d'apprentissage mais une explication adaptée à sa façon d'apprendre et une compréhension du mode de résolution du problème posé.

Face à une personne souffrant de troubles de langage, l'explication est un grand concept qui perd tout intérêt. On ne peut pas fournir d'informations explicitement aux malades, il faut qu'ils prennent conscience eux-même de leurs fautes, et ce n'est là qu'une partie des problèmes qu'engendre la rééducation des troubles du langage. Il n'est dans ces conditions pas possible, non plus, entre autres, de proposer un cours au malade.

Un programme de rééducation et un tuteur traditionnel ont cependant de nombreux points communs. Tous les principes que nous allons développer dans les annexes qui suivent restent en grande partie d'actualité, notamment en ce qui concerne les tuteurs intelligents.

Annexe B

L'ENSEIGNEMENT ASSISTÉ PAR ORDINATEUR

B.1 Introduction

L'Enseignement Assisté par Ordinateur ou E.A.O. se définit au sens large du terme comme l'utilisation d'un matériel informatique et de logiciels pour réaliser une formation ou un enseignement [DEMA 86]. Le terme "assisté" ne signifie pas que l'on entend enlever toute initiative à l'élève, mais au contraire qu'on veut l'aider à mieux prendre en charge son apprentissage.

Les racines de l'E.A.O. se trouvent dans l'enseignement programmé dont Skinner est l'instigateur [SKI 58] et qui prône un enseignement ayant pour principes pédagogiques d'éviter les erreurs et de renforcer les bonnes réponses.

L'utilisation de l'informatique dans le cadre de l'enseignement influe sur la place de l'enseignant qui n'est plus le seul détenteur du savoir, mais également sur celle de l'élève qui se trouve placé au centre du dispositif pédagogique, en relation plus ou moins active avec les savoirs qui se trouvent dans l'ordinateur. L'ordinateur est un médiateur entre l'apprenant et le formateur [MUC 87].

L'E.A.O. bien utilisé, trouve sa place aussi bien en formation initiale qu'en formation professionnelle et continue, avec des enfants ou des adultes, en présence ou non d'un formateur [MAD 87] : l'E.A.O. peut prendre des formes extrêmement variées et permet une formation décentralisée (à l'école, sur le lieu de travail ou chez soi), plus souple et mieux adaptée aux caractéristiques de l'apprenant.

L'apport principal de l'E.A.O. par rapport aux autres techniques pédagogiques (cours traditionnel, documents écrits, audiovisuel) est l'**interactivité** entre le didacticiel et l'apprenant. Pour cela, il faut que les techniques informatiques utilisées dans la réalisation d'un logiciel d'E.A.O. soient au service de la pédagogie et non pas l'inverse [CON 85], ce qui n'est pas toujours le cas : **l'élève est souvent le grand oublié en E.A.O.**

L'E.A.O. doit correspondre à un besoin qui permet d'accomplir différemment ou de manière plus efficace les actions de formation : "pourquoi utiliser l'ordinateur dans l'enseignement de telle ou telle discipline, si cela ne permet pas d'enseigner mieux, autrement ou autre chose?" [BERA 93]. Si ce n'est pas le cas, il vaut mieux continuer la formation de

façon classique. Les besoins peuvent aussi être d'ordre économique dans la mesure où l'E.A.O. peut réduire les coûts de formation.

B.2 Les objectifs de l'E.A.O.

B.2.1 Un outil pour le formateur

L'E.A.O. n'a pas pour objectif de remplacer les formateurs (en milieu scolaire, industriel ou tertiaire, hospitalier) par des machines, mais de leur fournir une technologie qui leur permette d'améliorer l'efficacité de l'acte éducatif, de les assister eux aussi [MAD 87, LUC 93, CAS 93]. L'E.A.O. permet à l'enseignant de se libérer de tâches répétitives [MOU 90].

L'ordinateur est un auxiliaire pédagogique au service de l'enseignant dans la réalisation de ses tâches quotidiennes : c'est un puissant instrument interactif et polyvalent qui permet de réaliser de multiples tâches concrètes en fonction de spécificités des différentes disciplines à enseigner et des préoccupations didactiques propres à ces matières ou à la classe d'âge auxquelles elles s'adressent [MAL 92]. C'est ce que soulignait le Professeur Simon en 1980 : "l'informatique est, dans le contexte éducatif, un outil ou un objet d'enseignement" [SIM 80].

En tant qu'outil pour le formateur, l'E.A.O. place en fait celui-ci au cœur du débat. Le formateur n'est pas seulement l'utilisateur de systèmes pédagogiques informatisés, il en est également le concepteur. Car, qui mieux que lui sait ce qu'il est nécessaire de réaliser au quotidien : ce sont en effet les connaissances, compétences et objectifs pédagogiques du formateur qui sont transcrits dans les logiciels. Le formateur peut donc réaliser lui même des petits logiciels créés au bénéfice de ses seuls élèves, ou participer à des projets plus ambitieux sur proposition de commissions d'experts [CON 85].

Pour Miele [MIE 92], l'ordinateur peut également servir à préparer les enseignements à l'aide de progiciels (banques de données sur CD-ROM pour la recherche documentaire, traitement de texte, tableur, éditeur graphique pour la réalisation de documents et de supports d'enseignement... [BERA 93, CAS 93, RON 93]). C'est ce qu'il appelle la "P.E.A.O." : Préparation de l'Enseignement Assisté par Ordinateur.

B.2.2 Un outil pour l'apprenant

B.2.2.1 A l'école

En milieu scolaire, l'E.A.O. permet à l'élève d'acquérir et d'utiliser des connaissances nouvelles dans les disciplines qui lui sont enseignées selon son propre rythme de travail [MOU 90]. Les types d'activité réalisés dépendent bien évidemment de la matière mais aussi des élèves (enfants, adolescents, adultes). Dans [QUE 91], M. Quéré et ses collaborateurs ont

réalisé une synthèse des activités de l'E.A.O. dans les disciplines suivantes : mathématiques (essentiellement de la résolution de problèmes), informatique (prise en main de l'ordinateur et de logiciels, apprentissage de la programmation et de méthodes de construction de programmes), médecine (questionnaires à choix multiple, études de cas), langues (compréhension écrite et orale, production de phrases), sciences physiques (expérimentation, simulation).

Ces activités conduisent à réaliser des logiciels très différents dans leurs concepts et objectifs mais tous à finalité éducative (cf. B.3).

B.2.2.2 En formation continue sur son lieu de travail

Les logiciels d'E.A.O. réalisés pour les personnels d'entreprise ont généralement pour objectif un perfectionnement, un recyclage ou une spécialisation. Dans ces applications on fait souvent appel à l'expérience des adultes. Car, contrairement aux enfants qui développent des apprentissages par initiation en ne voyant pas sur quels acquis antérieurs se greffe l'apprentissage actuel; pour les adultes : "si tout ce qui est appris est acquis, tout ce qui est acquis est bien loin d'être appris" [BOUT 85]. Les adultes peuvent ainsi transférer des aspects de leur expérience passée à la situation présente voire réactualiser certains des aspects de cette expérience antérieure.

Les adultes sont également beaucoup plus auteurs de leur apprentissage, car ils savent ce qu'ils veulent découvrir ou connaissent les points sur lesquels ils veulent se perfectionner. Il faut pour cela que l'environnement d'apprentissage leur laisse plus de liberté et soit moins directif.

Parmi les thèmes que l'on peut rencontrer pour cette catégorie de personnes il y a l'apprentissage de :

- la conduite de processus industriels,
- l'utilisation de machines,
- techniques et méthodes,
- langues étrangères,
- logiciels : outre l'apprentissage de l'informatique en elle-même, le personnel est appelé à suivre des formations concernant de nouveaux logiciels introduits dans leur branche d'activité si elle bénéficie déjà de l'apport de l'ordinateur ou de formations plus poussées comprenant également l'apprentissage de l'outil informatique si ce dernier fait son apparition dans le service,
- etc...

Les didacticiels traitant les trois points utilisent beaucoup la simulation de cas (cf. B.3.2.3).

B.2.2.3 Un moyen de rééducation

Les services rendus par l'ordinateur et ses périphériques aux personnes handicapées peuvent être de nature à faciliter ou rendre possible l'exécution de tâches (handicaps moteurs, visuels, auditifs), ou de nature à leur permettre de réduire voire d'annihiler leur handicap. C'est cette dernière possibilité qui nous intéresse en ce sens que l'ordinateur peut être un outil de rééducation venant en complément de l'action du thérapeute (cf. II.4).

B.2.3 Les objectifs pédagogiques de l'E.A.O.

Lorsque l'on réalise un système d'apprentissage, il est clair que c'est pour un usage pédagogique précis [MUC 87], avec des buts précis : l'objectif d'apprentissage est situé dans un contexte pédagogique et constitué d'une hiérarchie d'objectifs élémentaires [MERR 90]. Ceux-ci sont relatifs à des segments de connaissance qui doivent être arrangés dans un ordre séquentiel adéquat de sorte que chaque segment prépare l'élève au segment suivant [SKI 69b].

Le contexte pédagogique d'utilisation d'un système d'E.A.O. peut être [MUC 87] :

- *individuel*. L'apprenant utilise seul le logiciel dans le but d'acquérir des connaissances, un savoir-faire ou dans le but de s'entraîner,
- *collectif-individuel avec un animateur*. Dans ce cas, le logiciel est utilisé individuellement par chacune des personnes du groupe sous la tutelle de l'animateur. Ce type d'utilisation convient parfaitement aux séminaires de formation,
- *individuel-collectif avec animateur*. Chaque individu utilise le didacticiel par l'intermédiaire d'un réseau où le serveur est occupé par le formateur,
- *collectif-collectif avec animateur*. Chaque groupe d'apprenants est placé devant une machine qui simule par exemple une situation dans l'entreprise. Chacun des individus du groupe se voit confier une responsabilité, le but de la simulation étant de faire prospérer l'entreprise. Le rôle du formateur est ici de décortiquer étape par étape les résultats obtenus par le ou les groupes mis en compétition.

Quant aux principaux objectifs pédagogiques rencontrés en E.A.O., nous pouvons citer :

- l'acquisition de connaissances,
- le complément de formation,
- l'acquisition de pratiques, de savoir-faire et de raisonnements,

- la révision de connaissances ou la remise à niveau...

Pour arriver à ces fins, il est nécessaire d'employer des méthodes pédagogiques. En référence avec l'enseignement traditionnel, on peut :

- dispenser des cours ou présenter des exposés. Lors de cette activité, l'apprenant est totalement passif. On lui présente uniquement des pages de texte à assimiler sans contrôle des connaissances. Les didacticiels de ce type sont appelés **didacticiels informatifs**,
- réaliser des travaux dirigés : on propose à l'élève de résoudre des problèmes en l'aidant lorsqu'il ne trouve pas la solution ou qu'il se trompe (découverte ou résolution guidée de problèmes). Ces didacticiels sont appelés "**didacticiels d'exercice**" [QUE 91],
- réaliser des travaux pratiques : l'élève est placé devant un système simulant un processus quelconque pour lequel il a la possibilité de faire varier les paramètres : ce sont les **didacticiels de simulation**,
- contrôler ses connaissances. La connaissance acquise peut être contrôlée par l'intermédiaire d'épreuves spécifiques (**didacticiels de test**) ayant lieu avant (*pré-test*) ou après le cours (*post-test*) ou bien alors directement après l'acquisition d'éléments de connaissance comme c'est le cas dans les exercices,
- combiner cours, travaux dirigés, travaux pratiques et contrôle des connaissances dans des didacticiels appelés **tutoriels**,
- proposer des **activités ludiques** à caractère pédagogique.

B.3 Les catégories de logiciel d'enseignement

B.3.1 Définition d'un didacticiel

Ce néologisme désigne un logiciel spécialisé pour l'enseignement. C'est un programme informatique ayant un (ou des) objectif(s) de formation. Un didacticiel est par essence un outil didactique et doit à ce titre, assister, voire aider l'enseignant dans ses divers rôles et fonctions, mais, plus particulièrement dans ses fonctions de transmission des connaissances (savoirs et savoir-faire), d'entretien des connaissances, de contrôle et d'évaluation des savoirs et apprentissages [MAD 87, MUC 87].

Le didacticiel est la matière première de l'E.A.O., c'est la représentation informatisée d'un cours ou d'une leçon qu'il aura fallu structurer et transcrire sous une forme acceptable par l'ordinateur [MAD 87].

B.3.2 Les différents types de didacticiels

B.3.2.1 Généralités

Quéré et coll. [QUE 91] considèrent que les différents didacticiels peuvent être classés en trois grandes catégories en fonction du "degré d'intelligence" de ces logiciels :

- les didacticiels où tout est prédéfini (automate d'états finis) : le nombre d'étapes et leurs contenus sont figés avec un point d'entrée et un point de sortie (didacticiels informatifs, tests),
- les didacticiels dans lesquels le nombre d'étapes n'est plus fixe et le raisonnement à employer n'est pas prédéfini : le but à atteindre est bien fixé mais l'élève peut passer par différents chemins pour l'atteindre (simulateurs, tuteurs),
- les didacticiels de la troisième catégorie ne posent plus des questions mais des problèmes qu'ils savent résoudre. Ces problèmes nécessitent souvent plusieurs étapes dans le raisonnement ou permettent à l'élève d'effectuer des choix, de poser des questions au système (tuteurs intelligents). Les didacticiels de ce type emploient des techniques d'Intelligence Artificielle, ils seront traités dans le chapitre suivant.

B.3.2.2 Les didacticiels informatifs

Ces logiciels servent à présenter des connaissances dans un domaine donné sans chercher à vérifier leur acquisition par l'apprenant :

- ce sont des "livres sur ordinateur", des cours constitués de pages de livres mis sur ordinateur [MUC 87]. Ce genre de didacticiel porte un énorme préjudice à l'E.A.O. Parfois, la seule action de l'apprenant consiste à lire et à tourner les pages contenant du texte, des graphiques fixes ou animés voire texte et graphiques simultanément [FORT 85]. Ces logiciels n'apportent rien de plus qu'un livre, avec par dessus le marché une utilisation moins confortable (le lecteur n'a même pas toujours la possibilité d'aller directement vers la page voulue). Il existe même depuis peu un lecteur de CD-ROM combinant un écran de quelques lignes de texte spécialisé à cet effet : le data Discman de Sony. On le trouve commercialisé en France avec le dictionnaire électronique Hachette et le Petit Robert français-anglais aux alentours de 4000 F. Il sera sans doute bientôt suivi de son petit frère, le Bookman équipé de batteries rechargeables et qui dispose d'un clavier, d'une touche de déplacement du curseur à l'écran et d'un écran monochrome offrant une résolution de 300 x 200 points,

- cette présentation de connaissances peut aussi s'accompagner de recherches. On parcourt ainsi un "catalogue automatisé" : recherche d'ouvrages de bibliothèques et d'articles de médiathèques dans une banque de données [BOUR 93]...
- les logiciels encyclopédiques entrent également dans cette catégorie. La connaissance y est divulguée généralement à l'aide de menus que l'apprenant peut parcourir à son gré et à son niveau [CAS 93], en ne cherchant que ce qui l'intéresse. Ces logiciels permettent d'avoir des informations de plus en plus détaillées lorsque l'élève fait une recherche en profondeur. Par exemple, les atlas géographiques fournissent des cartes détaillées et des informations économiques, démographiques voire historiques,
- les logiciels (traitements de texte, bases de données, etc.) proposent généralement une recherche d'information par l'intermédiaire de la souris. En pratique, il s'agit de cliquer sur des mots-clés, souvent signalés par une couleur ou une typographie différentes de celles du texte courant. Chacun de ces mots correspond à un nouveau texte, que l'on peut consulter, émaillé lui aussi de mots-clés. Ce mode recherche évoque la consultation d'un dictionnaire,
- l'hypermédia est une extension de la notion d'hypertexte à d'autres types d'information : images graphiques ou digitalisées, son et voix, etc. De nombreux logiciels l'ont adopté, dont notamment les programmes consultables (encyclopédies, documentaires) et les CD-ROM.

Ces logiciels sont généralement la copie d'autres supports d'information tels les livres ou plus rarement les documentaires lorsqu'ils intègrent des techniques multimédia. Les principaux intérêts de ces logiciels sont :

- leur mise à jour aisée qui permet d'avoir des informations fiables ou récentes,
- de mettre l'utilisateur d'encyclopédies ou de catalogues en situation de chercheur guidé puisque les informations disponibles sont suggérées par l'intermédiaire des différents menus,
- de permettre à des écoles ou à des associations à budget limité de bénéficier de ressources immenses dépassant largement le niveau de connaissances requis sur un seul CD-ROM ou sur quelques disquettes [CAS 93].

Certains logiciels de ce type sont accompagnés de petits questionnaires de vérification de compréhension [WOL 92] ressemblant aux tests des machines à enseigner de Skinner et qui permettent à l'élève de poursuivre sa lecture / apprentissage par des chemins différents : "dictionnaire informatique" [MUC 87].

B.3.2.3 Les didacticiels de test

Les tests servent plus à la vérification des connaissances qu'à l'apprentissage ce sont plutôt des outils d'évaluation didactique que des didacticiels [FORT 85]. Ces questionnaires regroupent généralement des questions de type "questions à choix multiple" (Q.C.M.) et plus rarement des questions à réponse ouverte et courte (Q.R.O.C.) et au mieux des exercices généralement simplistes.

L'analyse des réponses se contente de la vérification de leur correspondance avec la solution pré-enregistrée, soulignée parfois par la pauvreté du message renvoyé à l'élève du style "correct" ou "faux".

Lorsque le test est terminé, l'élève reçoit sa performance (pourcentage de bonnes réponses, nombre de questions posées) dont il doit lui-même tirer les conclusions.

On pourra reprocher le caractère simpliste de ces questionnaires, mais la réponse de l'élève doit être limitée (choix, mot, plus difficilement une phrase courte) pour que l'ordinateur puisse l'analyser.

B.3.2.3.1 Les Questionnaires à Choix Multiple

Un questionnaire à choix multiple est une suite de questions fermées, c'est-à-dire pour lesquelles il s'agit de cocher une réponse entre plusieurs (le minimum étant deux).

Les Q.C.M. sont largement employés, même dans l'enseignement traditionnel. Ils permettent de faire une évaluation objective, car le résultat sera toujours le même quel que soit le correcteur. Mais, réaliser un Q.C.M. n'est pas une solution de facilité, car l'élaboration d'un bon Q.C.M. est difficile et rédiger les commentaires à délivrer après les réponses l'est encore davantage.

L'utilisation de Q.C.M. dans les didacticiels d'E.A.O. (où toutes les situations sont prévues d'avance) est très facile à mettre en oeuvre. Il ne s'agit que d'analyser une réponse à choisir dans une liste donnée : la machine aura à reconnaître le code prévu pour la réponse donnée par l'élève et à envoyer les commentaires prévus par l'auteur pour cette réponse [DEMA 86].

Diagnostiquer et commenter la performance n'a d'intérêt que si l'apprenant "joue le jeu", ce qui n'est pas toujours le cas : il faut bien donner une réponse, or l'ensemble des réponses se trouve à l'écran, cela permet à l'élève de donner une réponse au hasard (et peut-être la bonne) parmi les choix proposés. Pour contrer cela, il existe plusieurs techniques : la pondération probabiliste, qui estime la probabilité d'une réponse au hasard [SOR 74], la dépendance des questions, la présence de questions pièges (distracteurs ou questions reformulées)...

L'utilisation d'un Q.C.M. peut être un bon moyen de vérifier les connaissances de l'élève, mais cette activité répétitive de choix entre plusieurs possibilités devient très vite lassante pour l'apprenant. D'autre part un Q.C.M. a tendance à évaluer des connaissances morcelées et se prête difficilement à l'évaluation de savoir-faire et de raisonnements.

B.3.2.3.2 Les Questionnaires à trous ou à réponse ouverte

Les questionnaires à trous consistent à remplir des espaces blancs présents dans la réponse à fournir. C'est une activité qui demande davantage de réflexion que dans le cas d'un Q.C.M. puisque l'élève n'a plus la réponse sous les yeux parmi un ensemble de distracteurs. Skinner employa cette technique dans ses machines à enseigner. Il s'agissait d'épreuves où l'apprenant devait compléter une phrase avec un mot avant de découvrir la solution [SKI 58]. Le principe pédagogique de ces machines était d'éviter que l'apprenant fasse des erreurs. On lui facilitait grandement la tâche, car chacune des phrases faisait référence à une notion vue juste avant ou évoquée en détail dans la question. On serait même tenté de dire que "la réponse était contenue dans la question".

Généralement, dans un Q.R.O.C., l'étudiant doit produire une réponse dans le cadre d'un contexte dont il vient de prendre connaissance ou qui est précisé dans l'énoncé même du problème : les outils qui permettent à l'élève de répondre sont dans son environnement immédiat.

Lorsque les trous sont bien construits, les réponses possibles sont limitées au contexte et sont constitués d'un mot ou d'une phrase courte :

- réponses correctes : équivalences orthographiques, synonymes, mots -clés,
- réponses incorrectes : mots interdits,
- mots pouvant apparaître dans des réponses en langage naturel qui ne doivent pas être pris en considération.

Le traitement des réponses (analyse, commentaire ou question supplémentaire adaptée) est donc analogue au cas du Q.C.M., puisque tout est pré-enregistré.

Ici aussi, l'activité est répétitive et finit par lasser l'apprenant, d'autant que l'auteur tombe parfois dans la facilité et les trous ne sont alors hélas, que des mots gommés dans le texte [RICH 84].

Parmi les applications utilisant des Q.R.O.C., on pourrait citer les logiciels éducatifs où l'écopier doit écrire (totalement ou partiellement) le nom d'un objet représenté graphiquement, les logiciels d'apprentissage de langues (traduction)... Dans ces épreuves, on a la possibilité de

faire en sorte que la réponse ne soit pas écrite noir sur blanc dans la question puisque on évoque un dessin ou un mot écrit dans une autre langue.

B.3.2.4 Les didacticiels d'exercice ou d'entraînement

Ces logiciels sont plus complets que les tests. Ils sont constitués d'une batterie d'exercices auxquels on a adjoint une présentation des connaissances. Selon Forte [FORT 85], les exercices (*drills*) sont une succession de questions comprenant :

- un énoncé de connaissance. Généralement une règle,
- des exemples d'application de cette règle,
- une question à trou ou à choix multiple relative à la règle ou à son emploi,
- le traitement immédiat de la réponse avec possibilité d'aider l'apprenant et de lui laisser la possibilité de corriger sa réponse avant de lui donner la réponse au bout d'un certain nombre de tentatives.

Dans ce type d'épreuves, l'élève est guidé pour atteindre l'objectif ou la solution en ayant la possibilité d'utiliser le raisonnement qu'il désire, en suivant toutefois le cheminement prévu par la machine qui compare les réponses de l'élève avec celles attendues. Le dialogue, et donc la succession des activités, est entièrement dirigé par la machine qui prend les décisions en fonction des réponses de l'élève [QUE 91]. L'interactivité est à sens unique, l'élève subit un enseignement rigide et les exercices posés sont pré-enregistrés car la machine n'est pas experte et ne sait pas les résoudre de façon autonome [WOL 92]. Mais, il y a cependant un net progrès puisque le nombre d'étapes n'est plus fixe, l'étape suivante dépend des réactions de l'élève [QUE 83] et peut s'inscrire dans une liste d'exigences contenant les expressions qui doivent être formulées par l'élève ainsi que l'ordre dans lequel elles doivent apparaître [WOL 92].

Les exercices sont particulièrement bénéfiques pour deux catégories d'apprenants : les apprenants des toutes premières années du primaire et les moins doués [QUE 91].

B.3.2.5 Les didacticiels de simulation

L'utilisation de la simulation à des fins pédagogiques est devenue indispensable. Elle constitue un pont entre deux mondes qui étaient séparés : l'école et le milieu professionnel. Le but de ces logiciels est de faire découvrir à l'élève des concepts en mettant l'apprenant face à un problème qu'il doit résoudre en changeant les paramètres du système modélisé dans la machine et en tenant compte d'un ensemble de contraintes qui lui sont données [QUE 91, MUC 87].

Au niveau de la formation scolaire, le simulateur permet à l'apprenant de disposer de processus qu'il peut regarder évoluer avec ou sans interaction de sa part.

Interactivité et convivialité sont des notions importantes en simulation., intimement liées à la conception de l'interface Homme-Machine. Ces caractéristiques font l'objet d'importantes recherches au Centre d'Automatique de Lille, où l'on s'active également à formaliser la modélisation et la simulation de systèmes industriels par l'intermédiaire de langages à objets [MAR 91, CHI 91, MOS 94] ou de réseaux de Pétri [FEL 95].

En milieu industriel ou tertiaire, le simulateur est une aide à l'établissement de modèles [NI 94], à l'entraînement du personnel et à la prise de décision : le simulateur permet à l'opérateur de tester des changements opératoires et de vérifier qu'ils conduisent bien aux buts visés avant de les rendre effectifs sur le processus réel [BADA 90, MON 94]. L'apprenant peut faire de nombreux essais facilitant son apprentissage :

- **visualisation de processus.** Les simulateurs modélisent fidèlement les processus : fonctionnement, durée de vie, temps moyen de fonctionnement avant panne, temps moyen de réparation [YER 94],
- **pilotage et contrôle de processus.** L'apprenant peut agir sur différents paramètres d'un processus qu'il sera amené à utiliser dans la réalité et effectuer ainsi un apprentissage de celui-ci [BENI 94]. A l'I.N.S.A. de Lyon notamment, l'équipe de P; Prévôt a réalisé un tuteur d'apprentissage industriel dans le cas d'une cimenterie [PRE 92], lequel a été produit à l'aide du système A.G.E.D.I. (Atelier de Genie Didacticiel) [AHM 93]. Cet apprentissage permet également à l'employé de savoir comment réagir si un incident se produit sur le processus. Incidents qui peuvent être limités à l'environnement même du processus (panne, accident du travail) ou qui peuvent avoir des répercussions mettant en danger la vie aux alentours du site et pour lesquels l'action à mener doit être prise rapidement et efficacement (pollution chimique, nucléaire),
- **prise de décision.** Mucchielli [MUC 87] cite l'exemple d'un simulateur employé dans le milieu bancaire destiné à former le personnel : l'ordinateur est un client sollicitant un prêt bancaire et l'apprenant joue le rôle du professionnel du service "crédit" qui doit décider si le prêt demandé sera accordé ou non. Le dialogue est mixte, questions et réponses peuvent provenir à la fois du simulateur et de l'apprenant,
- les simulateurs électroniques permettent à l'utilisateur de **concevoir** rapidement des montages électroniques et de les **tester** en évitant la réalisation de prototypes

réels. L'étudiant a ainsi la possibilité via le simulateur de comprendre et d'acquérir par la pratique les concepts théoriques qui lui sont enseignés [LEW 94, DMO 94],

- **modélisation.** Ces simulateurs permettent de modéliser des systèmes complexes (multi-entrées, multi-sorties, non-linéaires) ou d'effectuer des prédictions [MON 94],
- etc...

Les logiciels de simulation permettent à l'utilisateur dans certains cas d'effectuer une exploration libre et non guidée d'un système pour en découvrir les lois de fonctionnement ou les méthodologies sous-jacentes en formulant des hypothèses par action sur les paramètres de ce système. Il est très difficile alors de dire si l'élève a bien passé en revue tous les éléments pertinents avant d'arriver à une conclusion, pas plus qu'il n'est possible à l'élève de savoir s'il a suivi la meilleure méthode ou s'il est parvenu à la conclusion par des chemins détournés. On risque également de le voir tirer des conclusions générales qui ne représentent pas toutes les situations possibles, seul le comportement du modèle montre à l'élève s'il y a erreur ou non. Il n'y a donc pas d'accompagnement dans l'apprentissage en dehors des efforts faits par l'élève pour comprendre pourquoi tel ou tel paramètre a conduit à telle situation.

Dans d'autres cas, on évite cette situation en suivant et en contrôlant le parcours de l'élève. On se rapproche alors davantage du tutoriel [DEMA 86].

B.3.2.6 Les tuteurs

Le didacticiel tutoriel est le plus complet des didacticiels. Réalisé à l'aide d'un langage auteur ou d'un système d'auteur (cf. B.4), il comprend le cours magistral de la discipline à enseigner renforcé par des séances de travaux dirigés, des épreuves d'évaluation et des encouragements (les situations d'apprentissage sont pré-déterminées et les réponses sont pré-établies [DEMA 86]).

Par rapport aux simulateurs, l'élève n'est plus livré à lui-même, il subit un enseignement guidé, mais non rigide. Il ne s'agit pas de laisser l'élève nager en eaux troubles. L'ensemble des activités pédagogiques se déroulent dans l'optique d'atteindre l'objectif visé. Mais, l'évolution vers le but n'est pas forcément séquentielle, on laisse une certaine autonomie à l'élève. L'analyse de sa réponse permet soit de l'aider ou de lui permettre de corriger sa réponse, soit de l'aiguiller vers la suite [QUE 91, FORT 85].

Comme les didacticiels vus précédemment, les tuteurs reposent sur des scénarios prévus à l'avance par leur auteurs. Ils sont beaucoup plus complexes à réaliser car ils intègrent des

activités différentes (cours, exercices, tests...) et les connexions entre ces différents éléments peuvent aboutir à une explosion combinatoire difficilement maîtrisable.

B.3.2.7 Les pédagogiciels

Selon Forte [FORT 85], les pédagogiciels sont des tuteurs pour lesquels on exige que :

- le logiciel apporte réellement un "plus" à l'élève,
- l'auteur fera en sorte que son utilisation ne soit pas répétitive. L'utilisation des ressources graphiques et sonores de la machine à des fins pédagogiques doit permettre de le rendre plus attrayant donc plus motivant,
- la pédagogie fait appel à des évaluations de type Q.R.O.C. où les réponses sont formulées en langage naturel et traitées à l'aide d'un outil performant (grammaire, dictionnaire, recherche de synonymes et de similitudes orthographiques...) et non pas par comparaison avec des réponses pré-enregistrées. Cela autorise un dialogue plus convivial, mais le traitement en langue naturelle est difficile à réaliser. Dans cette optique, la grammaire utilisée doit s'avérer contextuelle et très simplifiée. Cette exigence s'avère difficilement réalisable par le concepteur d'un tuteur,
- le traitement des réponses sera combiné à des renforcements positifs destinés à encourager l'élève,
- l'aide peut s'appuyer sur des connaissances encyclopédiques directement accessibles lorsqu'il le désire. Cette aide devrait lui permettre d'approfondir ses connaissances de façon autonome et libre,
- la structure du logiciel sera telle qu'il sera facilement adaptable. Non pas par son auteur, mais par l'enseignant qui désire l'employer avec ses élèves [BES 92].

La réalisation d'un tel didacticiel n'est pas simple. Ces exigences nécessitent la collaboration d'équipes pluridisciplinaires (pédagogues, experts du domaine, informaticiens, psychologues et linguistes) et l'utilisation d'outils adaptés à la réalisation d'une application aussi complexe (systèmes auteurs).

B.3.2.8 Les jeux éducatifs

Ces logiciels éducatifs que Mucchielli [MUC 87] appelle *ludiciels* sont basés sur le jeu. Ils emploient de nombreux graphiques, animations et bruits servant à illustrer le contenu pédagogique et à motiver l'enfant. Les ludiciels sont essentiellement destinés à l'acquisition de notions élémentaires de dénomination (intrus, semblables...), lecture et écriture (trous à combler, correspondances mots / image, vocabulaire...), calcul et raisonnement (opérations arithmétiques directes ou résolution de petits problèmes arithmétiques...).

B.4 Les outils de création de didacticiels

B.4.1 Introduction

Les concepteurs de didacticiels ont les connaissances pédagogiques requises à l'élaboration de logiciels à caractère pédagogique, mais par contre ils manquent bien souvent de connaissances suffisantes en programmation [MAD 87]. Pour les aider dans leur tâche, des outils qui les déchargent du travail de programmation proprement dit ont été mis à leur disposition afin de leur permettre de mieux se consacrer à la structuration pédagogique du logiciel : langages de programmation spécialisés (langages auteurs), systèmes spécialement dédiés à la création de didacticiels (systèmes auteurs).

Le choix du logiciel de création est directement lié au matériel sur lequel sera implanté le didacticiel pour des raisons de portabilité (compatible I.B.M., McIntosh ou station de travail) [QUE 91].

B.4.2 Les langages auteurs

Les didacticiels sont des logiciels pédagogiques, il est donc naturel que les pédagogues eux-mêmes en soient les concepteurs. Malheureusement, ceux-ci n'ont pas forcément de connaissances informatiques dans les langages informatiques courants (C, Pascal, Basic...). Des langages informatiques évolués (ex :LSE : Langage Symbolique d'Enseignement...) ont donc été spécialement conçus à leur intention pour développer des applications pédagogiques de l'ordinateur.

Ces outils appelés *langages auteurs* évitent la programmation dans un langage classique mais requièrent quand même des compétences informatiques [MAD 87]. Un langage auteur est un langage de "haut niveau" dans lequel on a incorporé des fonctions utiles à l'enseignement pour la création de didacticiels [BIDE 85]. Il offre des facilités de programmation (macro-instructions spécialement écrites qui représentent une synthèse de plusieurs expressions d'un langage de programmation classique) pour réaliser des pages-écrans, des graphiques et des manipulations de pages et de graphiques.

Le système d'écriture des programmes ressemble à du langage naturel, cela rend ces programmes plus compréhensible [BIDE 85].

Les langages auteurs ne sont toutefois pas la panacée. Certes, ils offrent de grandes possibilités, mais ils imposent un apprentissage important comparable à celui que réclame un langage de programmation classique [MUC 87]. Cependant, les rendre plus simples d'emploi conduirait à les rendre plus limités et plus directifs.

Il y a une grande disparité entre les langages auteurs disponibles. Certains langages auteurs n'autorisent que la création de didacticiels simples (tests, exercices) : PILOT [BIDE 85].

D'autres langages auteurs ont des capacités plus importantes. Ils disposent d'outils d'édition de dialogue, d'outils graphiques, d'outils d'analyse de la réponse en langage naturel, de possibilités d'aiguiller le système vers un module en fonction de la réponse...On trouvera dans [MAD 87, DIA 88] les caractéristiques des langages auteurs suivants :

- ARLEQUIN,
- DUO,
- SUPERPILOT,
- EGO,
- Dr. LEO.

B.4.3 Les systèmes auteurs

Contrairement aux langages auteurs, les systèmes auteurs ne sont pas des langages facilitant l'écriture des didacticiels, mais des générateurs de didacticiels à la disposition de tous ceux qui désirent réaliser plus facilement et plus rapidement de telles applications **sans avoir à connaître un langage de programmation** [MAD 87, BIDE 85].

Un système auteur propose des utilitaires qui permettent de réaliser le dialogue constitué de **situations pédagogiques** (scène, sollicitation, analyse et jugement de réponse) [MUC 87, MAD 87] :

- gérer les périphériques de l'ordinateur (éditeur d'écran mêlant textes et graphiques, souris, clavier, son, disquettes...),
- réaliser les pages écran du didacticiel : **la scène**. La scène [DIA 81],
- créer les interactions avec l'élève : sa **sollicitation** ,
- simuler tout ou partie du logiciel pour le rendre exécutable,

Dans [MAD 87] on trouvera la description des systèmes auteurs suivants :

- EURIDIS,
- EVA,
- PEN.

B.4.4 Conclusion

Les langages auteurs sont généralement plus puissants et plus souples que les systèmes auteurs. Ils permettent de réaliser n'importe quel type de didacticiel, mais au prix d'un apprentissage souvent complexe.

Les systèmes auteurs par contre sont facile d'emploi, ne nécessitent guère d'apprentissage, mais l'auteur a beaucoup moins de liberté pour définir son didacticiel : il doit se couler dans le moule prévu par les concepteurs du système [MAD 87].

B. 5 Les défauts et limites de l'E.A.O.

Le principal défaut que l'on peut reprocher aux systèmes d'E.A.O. est de ne laisser aucune initiative de dialogue à l'élève [MOU 90]. La pédagogie de ces systèmes éducatifs est généralement dépassée : les didacticiels traditionnels dans lesquels l'apprenant est ballotté de questions en réponses pré-enregistrées et établies par les auteurs d'un système figé [DEMA 86, WEN 87] sont d'un intérêt limité et source de rejet de la part des élèves confinés dans un rôle passif [CON 85].

Le traitement des réponses de l'élève se fait uniquement en fonction de leur conformité aux réponses pré-enregistrées et ne tient pas compte en fait de leur nature [HAT 92], la logique de l'ordinateur est implacable : toute erreur ou faute est sanctionnée. Aucune nuance dans le raisonnement n'est acceptée si elle n'a pas été prévue, principe contraire à la réalité où tout est nuancé [CON 85].

Et quand l'élève reste bloqué en cours de route, plus souvent du fait qu'il ne comprend pas la question (posée par un expert du domaine d'apprentissage qui a sa propre façon de voir le problème) plutôt que de la non-connaissance de la réponse, rien ou pas grand chose n'est prévu pour lui venir en aide.

Un didacticiel ne peut être la transcription sur ordinateur de la démarche et des formes propres aux livres de cours et au cours magistral, pas plus que le remplacement du formateur. Dans ce type de logiciels, **on ne se soucie pas des caractéristiques de l'élève**, de ses désirs en matière d'apprentissage, de sa façon d'aborder un problème, de le résoudre et de son rythme de progression ni de la présentation même du logiciel dont l'interface de dialogue est parfois d'une tristesse affligeante. Tout au plus s'agit-il d'un dressage, un moule dans lequel tous se conforment identiquement à l'aide d'un système extrêmement rigide : "un automate à états finis" [QUE 91].

La faute incombe directement aux concepteurs de didacticiels. Réaliser un bon didacticiel est un travail de longue haleine qui va de la définition des objectifs à l'élaboration du contenu découpé en séquences, en passant par les évolutions d'une étape à l'autre constitués d'une interactivité entre l'élève et la machine [MUC 87]. Ceci concerne la première phase du projet. La deuxième phase du projet est l'écriture du didacticiel. Et à ce sujet, malgré la disponibilité d'outils prévus à cet effet, les auteurs de didacticiels sont souvent rebutés par l'apprentissage d'un langage ou d'un système auteur.

Il serait mesquin de faire porter la totale responsabilité des défauts des didacticiels à leurs concepteurs. Les langages auteurs et systèmes auteurs ne permettent pas de réaliser des systèmes ouverts capables d'évoluer en douceur du fait de la rigidité qu'ils impliquent. Modifier, ajouter ou insérer un segment de programme est d'une grande lourdeur car tout doit être prévu : aussi bien les connexions avec les modules précédents qu'avec les modules suivants.

On oublie également trop souvent de tenir compte des moyens matériels à la disposition des créateurs. Jusqu'à une période encore très proche (l'obsolescence rapide du matériel est toujours d'actualité, mais les performances des machines actuelles n'a plus rien de comparable avec ce qui se faisait il y a moins de dix ans), les micro-ordinateurs étaient très limités en mémoire, vitesse, puissance et possibilités graphiques et d'une grande hétérogénéité matérielle limitant la portabilité des logiciels (réduite avec l'apparition du P.C. et du système d'exploitation D.O.S. d'I.B.M. dans les années 1980) [BES 92]. Il s'agissait d'autant de carences à la réalisation d'un bon didacticiel. Les logiciels souffrent également d'un problème de prix de revient, d'une diffusion limitée et d'une concurrence importante. Concurrence qu'il est difficile d'établir au niveau de la qualité du produit sans qu'ait lieu une évaluation préalable selon différents critères : économique et pédagogique [MUC 87]. Dans ce domaine, on peut s'attendre au meilleur comme au pire. Cela contribue également à freiner leur développement commercial notamment au sein de l'Education Nationale.

D'autre part, si l'E.A.O. a pris un tournant décisif dès les années 1970 en introduisant des techniques d'Intelligence Artificielle dans les systèmes, force est de reconnaître que ces systèmes n'ont pour la plupart jamais quitté les laboratoires de recherche dont ils étaient issus. Aux insuffisances de puissance et de disponibilité des machines, il fallait ajouter le coût prohibitif des outils d'I.A. utilisés, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui.

B.6 Conclusion de l'Annexe B

L'apport du multimédia devrait permettre de réaliser des applications beaucoup plus conviviales et attrayantes.

Le développement d'un bon didacticiel est un processus complexe qui nécessite la collaboration de plusieurs experts (pédagogue, expert du domaine, informaticien, ergonomiste...).

La constitution de telles équipes unies dans un projet commun (la réalisation de didacticiels à but commercial) ne concerne pas seulement les sociétés de services en informatique. Des sociétés spécialisées en E.A.O. pour les enfants et adolescents (nous pourrions citer GENERATION 5 et EDUSOFT, la filiale de NATHAN) commercialisent des logiciels scolaires utilisant le multimédia. Ces logiciels présentés sous forme de jeux éducatifs pour les plus jeunes, jusqu'à des environnements intégrant des encyclopédies avec graphismes animés et voix digitalisées, proposent des activités concernant des matières générales (mathématiques, français, musique, langues, géographie, chimie) ou des thèmes plus spécifiques (fonctionnement d'appareils : ordinateur, auto..., astronomie, corps humain...).

Réalisés très spécifiquement, beaucoup de ces logiciels ne concernent qu'une partie de la matière enseignée. Ainsi, pour les mathématiques au primaire ou au collège, les collections comprennent généralement un ou deux logiciels par niveau, mais, ils ne sont **pas adaptables** par les enseignants à leurs propres besoins.

Ce souci d'adaptation, de reconfiguration au matériel et d'ouverture des didacticiels a conduit à réaliser des architectures d'ateliers de génie logiciel. Parmi ces ateliers, on peut citer [BES 92] :

- l'A.D.M. (Atelier Didactique Multimédia) qui est constitué de boîtes à outils dont un système expert et une interface homme / machine,
- l'A.G.D.I. (Atelier de Génie Didacticiel Intégré) permettant de traiter tous les problèmes de développement pédagogique et d'intégration d'outils informatiques satisfaisant le niveau de l'A.D.M..

Ces ateliers sont des structures d'accueil d'un ensemble de méthodes et d'outils permettant la prise en compte de ces principes pour l'élaboration de didacticiels ou de tuteurs intelligents (cf. Annexe C). L'intérêt principal de ces ateliers est de permettre à des équipes différentes de développer des outils spécifiques qui seraient intégrables puisque basés sur les mêmes spécifications externes [BES 92].

Annexe C

L'E.I.A.O. : L'ENSEIGNEMENT INTELLIGEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR

C.1 Introduction

A l'instar de l'E.A.O. traditionnel qui s'inscrit dans la filiation de l'enseignement programmé directement issu des théories béhavioristes [SKI 69b], une nouvelle famille de logiciels d'enseignement pointe à l'horizon du paysage éducatif. Ces logiciels appelés *Tuteurs "Intelligents"* (Intelligent Tutoring Systems [SLE 82]) se regroupent sous la bannière de l'E.I.A.O, acronyme qui réunit au propre comme au figuré les termes E.A.O. et I.A. (Intelligence Artificielle). Il est prudent de mettre le terme intelligent entre guillemets car l'utilisation de techniques d'Intelligence Artificielle ne permet pas d'affirmer que tous les logiciels d'E.I.A.O. se comportent intelligemment [QUE 91].

On considère généralement que la recherche sur les Tuteurs Intelligents a débuté au début des années 1970 avec les travaux de Carbonell [CAR 70] et de son désormais classique système : SCHOLAR, dont le domaine d'application est l'enseignement de la géographie de l'Amérique du Sud. SCHOLAR se distinguait de l'E.A.O. traditionnelle essentiellement du fait de la séparation de la connaissance de la matière à enseigner, de la façon de l'enseigner et de l'apparition d'un dialogue mixte entre la machine et l'apprenant où questions et réponses en langage naturel pouvaient provenir de l'un comme de l'autre. Ces démarches novatrices avaient été rendues possibles grâce à l'utilisation de techniques d'Intelligence Artificielle (réseau sémantique de faits, concepts et procédures [CAR 70]).

Afin de se rapprocher davantage du comportement humain que ne le font les didacticiels d'E.A.O. classique, les Tuteurs Intelligents sont caractérisés par l'intégration d'outils d'Intelligence Artificielle et de Sciences Cognitives (pédagogie, psychologie cognitive [KEA 87b, NIC 88, TERK 90]) comme le montre la figure C.1. Dans les Tuteurs Intelligents, l'accent est mis sur la relation entre l'élève et la machine, on fait du "sur mesure". On n'habille plus...tous les esprits de la même façon, au risque que certains se trouvent étriqués alors que d'autres se noient dans un vêtement trop vaste : l'apprenant ne subit plus un enseignement rigide et sans imagination, il devient "l'acteur de sa propre formation " [HAT 92] avec à sa disposition une machine qui devient un support de connaissance.

Cela permet d'ouvrir un espace pédagogique enrichi par des possibilités nouvelles de sanctions et de scénarios :

- l'E.I.A.O. permet à l'apprenant de bénéficier d'un système d'apprentissage qui ne lui signifie pas uniquement si la réponse est correcte ou non, ce qui est fragile pédagogiquement, mais peut lui apporter une aide et des explications appropriées...,
- le passage d'un segment de programme à un autre n'est pas défini par avance et tient compte des particularités de chaque apprenant.

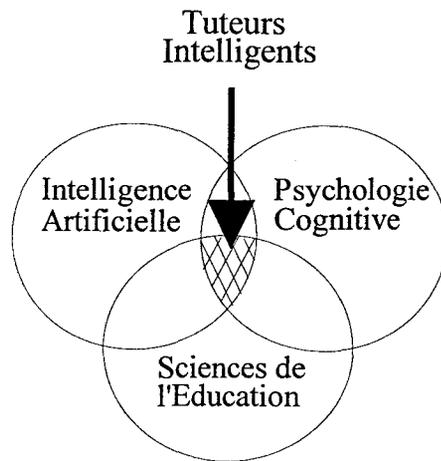


Fig. C.1 : Les sciences cognitives intervenant dans les Tuteurs Intelligents

C.2 Les principaux systèmes d'E.I.A.O.

M.C. Haton [HAT 92] considère que les principaux systèmes d'E.I.A.O. peuvent être classés en trois catégories :

- les Systèmes Experts (fig. C.2), qui à l'origine n'étaient pas dédiés à l'enseignement (MYCIN [SHO 76] puis NEOMYCIN [CLA 84]). MYCIN est un système expert capable de réaliser un diagnostic médical dans le domaine des maladies infectieuses du sang. MYCIN et NEOMYCIN ont servi de base à la création des didacticiels GUIDON puis GUIDON2 [CLA 83, CLA 87, WEN 87]. GUIDON est le premier tuteur à avoir intégré un modèle de l'élève : lors d'un cas d'infection choisi et décrit par GUIDON, les éléments de diagnostic de l'apprenant sont comparés à ceux de l'expert proposé par MYCIN dans le même contexte, le tuteur n'intervenant que quand l'apprenant demande de l'aide ou quand ses actions sont insuffisantes,
- les *didacticiels utilisant un système de résolution de problèmes* auxquels on a ajouté une batterie d'exercices (sans solution programmée). Par rapport aux

systèmes experts, ces programmes intègrent des notions de pédagogie, ce qui les rend plus adaptés à la transmission de connaissances. Ces systèmes s'adressent à des personnes qui souhaitent se perfectionner dans un domaine afin d'en devenir experts : SOCRATE est un système de ce type dédié au diagnostic et à la formation au diagnostic sur des équipements comportant des axes asservis [MOU 90]). A cela nous pouvons ajouter les logiciels de simulation comme SOPHIE (diagnostic de pannes électroniques) [BRO 82]. Ces systèmes consistent à mettre l'apprenant face à un problème qu'il doit résoudre en tenant compte d'un ensemble de contraintes données par l'ordinateur (résolution de problèmes) ou devant des situations sur lesquelles il peut intervenir en étant guidé (simulation de cas) [MUC 87],

- les *Tuteurs Intelligents* dont nous verrons la description ultérieurement (fig. C.3). Intervenant en complément et non en remplacement du formateur, le Tuteur Intelligent doit permettre la diversification des formes d'apprentissage. Plus spécifiquement, l'auteur d'un système d'E.I.A.O. doit être en mesure d'y incorporer les stratégies pédagogiques et les connaissances de la matière à enseigner possédées par les "bons enseignants" [KEA 87a].

Les micro-mondes comptent également parmi les applications appartenant au domaine de l'E.I.A.O. Les micro-mondes n'assurent pas un apprentissage [THO 87] : LOGO [PAP 80] est un langage de programmation permettant de réaliser des systèmes de simulation permettant à l'enfant de créer et d'apprendre en développant ses propres théories et concepts [WEN 87]. Les mathématiques, et en général l'ensemble des systèmes à base de simulation, situés à la frontière entre l'E.A.O. et l'E.I.A.O., sont le principal domaine d'application des micro-mondes.

C.3 Les apports de l'Intelligence Artificielle à l'E.A.O

C.3.1 l'Intelligence Artificielle

La définition la plus ambitieuse qu'il est possible de donner de l'I.A. est la suivante : "technique informatique qui permet à l'ordinateur de raisonner". L'Intelligence Artificielle est la discipline qui cherche à comprendre la nature de l'intelligence en construisant des programmes d'ordinateur imitant l'intelligence humaine [BON 84]. Pour Haton et coll. [HAT 91], il s'agit de "concevoir des systèmes capables de reproduire le comportement de l'être humain dans ses activités de raisonnement."

L'Intelligence Artificielle permet à une machine de réaliser des choses pour lesquelles les hommes sont meilleurs pour le moment [RIC 87], pour lesquelles on ne connaît pas de méthode de résolution directe et assurée [FAR 87] : se souvenir d'une situation, donner un avis, apprendre, raisonner, résoudre un problème, exploiter un savoir, etc. [WIN 84]. Soit des activités qui ne peuvent pas être modélisées sous forme algorithmique (traiter des symboles qui représentent des faits, des propositions), des processus différents du calcul d'une racine carrée ou de tout autre calcul numérique.

L'Intelligence Artificielle cherche à comprendre les mécanismes de compréhension en se distinguant des autres sciences cognitives (psychologie, linguistique, philosophie, épistémologie, neuro-sciences) par son outil central d'investigation : l'ordinateur [FAR 87].

Il convient d'ajouter que le cerveau humain n'est pas une *machine programmée à l'avance*. L'homme est capable d'étudier plusieurs solutions à la fois, de reconnaître qu'il est dans une impasse et de revenir en arrière, d'avoir l'intuition que telle solution est meilleure, que telle autre est à écarter. Ces principes sont la base de tout système d'Intelligence Artificielle.

En résumé :

L'Intelligence Artificielle permet aux didacticiens de mieux prendre en compte :

- la mise en oeuvre d'une véritable stratégie pédagogique,
- l'aide à la résolution de problèmes et l'apport d'explications appropriées à l'initiative de la machine ou sur demande expresse de l'élève,
- l'évaluation des performances,

en somme, des qualités qui manquent aux systèmes d'E.A.O. traditionnels.

C.3.2 Représentation des connaissances et raisonnement en Intelligence Artificielle

C.3.2.1 Introduction

La connaissance humaine acquise lors d'apprentissages comprend des **savoirs** (représentation des objets du monde réel, descriptions factuelles de ces objets, événements...), des **savoir-faire** (règles déductives, heuristiques...) des **stratégies** d'emploi de la connaissance.

Cette connaissance peut ainsi revêtir trois formes : **déclarative** (centrée sur la description des connaissances indépendamment de leur utilisation), **procédurale** (centrée sur l'utilisation de ces connaissances), et **méta-cognitive** (connaissance sur la connaissance ou façon dont les connaissances doivent être utilisées) [DED 86, BAR 86, HAT 91].

Ces notions se retrouvent dans les systèmes qui tentent de reproduire le raisonnement humain en faisant appel à l'Intelligence Artificielle. L'élaboration de tels systèmes nécessite d'y intégrer d'une part la **connaissance** et d'autre part des **mécanismes qui permettent de l'exploiter** [HAT 91].

Ce travail est double. Il faut d'une part faire l'acquisition des connaissances, d'autre part les transférer de l'homme à la machine. C'est le rôle du *cogniticien* [HART 88].

C.3.2.2 La représentation des connaissances

La représentation des connaissances a un rôle très important en I.A. La recherche de la représentation la plus appropriée d'un problème est parfois la phase la plus laborieuse de sa résolution. Pour bien résoudre, il faut commencer par bien représenter. Suivant la nature du sujet traité, la représentation de la connaissance peut revêtir différentes formes [DUP 88, HAT 91, MAT 86, WIN 84]: procédurale, règles de production, représentations logiques, réseaux sémantiques, frames et objets structurés, réseaux de contraintes, listes et réseaux neuronaux.

Il n'est pas rare que la connaissance à modéliser utilise plusieurs modes de représentation simultanément, on parle alors de représentation *hybride* [DUP 88].

C.3.2.2.1 Représentation procédurale

Représenter les connaissances sous forme procédurale revient à réaliser un système pour lequel toutes les connaissances, la façon de les utiliser, et la conduite du raisonnement sont entièrement figées sous forme d'algorithmes, ou ce qui revient au même, sous formes d'automates finis.

L'emploi d'une telle représentation axée sur la réalisation de procédures d'utilisation des connaissances pose un problème, celui de la quantité de solutions à évaluer qui croît exponentiellement avec le nombre de variables du système. Au delà d'un certain seuil de complexité, l'ampleur de l'explosion combinatoire fera qu'un algorithme de recherche par exploration systématique sera rendu inutilisable. On préférera alors utiliser une résolution par heuristiques qui est un moyen de réduire les alternatives. Les choix effectués grâce à une heuristique ne sont pas non plus nécessairement irrévocables, mais si elle est efficace, on reviendra plus rarement sur ces choix.

Un autre problème posé par ce type de représentation est l'ajout de nouveaux faits au système qui passe non seulement par l'ajout de procédures mais aussi par la modification du corps du programme, donc de l'existant. Il faut dans ces conditions systématiquement revoir l'ensemble du fonctionnement du programme, ce qui dénote un manque évident de souplesse (cf. C.3.3.2.1).

C.3.2.2.2 Les règles de production

Le mode de représentation basé sur les règles est bien adapté au diagnostic et de ce fait il est souvent utilisé pour la réalisation de Systèmes Experts [SHO 76, LAU 83, LAU 88]. c'est un moyen simple de représentation des connaissances. Les règles de production contenues dans la *base de règles* du S.E. sont des énoncés ayant la forme : *SI Condition ALORS Conclusion* que l'on peut exprimer comme "des conduites à tenir devant une situation donnée" [QUE 91].

Les conditions sont des formules logiques qui doivent être vérifiées pour que la règle s'applique. La partie conclusion permet d'ajouter ou de retirer des faits dans la base de faits. Ce formalisme est bien adapté aux connaissances ayant peu de liens entre elles [QUE 91].

C.3.2.2.3 Les représentations logiques

En logique, toute connaissance est représentée par une formule construite suivant une syntaxe précise à l'aide d'un langage formel [NIL 88]. Ce mode de représentation utilise plus particulièrement le calcul propositionnel et le calcul des prédicats [BRI 88] :

- en **calcul propositionnel** (logique d'ordre 0), la description des connaissances se fait sous forme de propositions qui peuvent être soit vraies, soient fausses [DELA 87],
- le **calcul des prédicats du premier ordre** (généralisation de la logique propositionnelle : logique d'ordre 1) permet d'exprimer des connaissances complexes de façon rigoureuse sous forme de *clauses*. L'application de stratégies de résolution à ces clauses permet alors d'inférer de nouvelles connaissances dans le but de résoudre le problème posé [FAR 87].

C.3.2.2.4 Les réseaux sémantiques

Les réseaux sémantiques sont basés sur des graphes dont les noeuds représentent des concepts ou des événements, ces noeuds étant reliés par des arcs qui représentent des relations entre les concepts [NIL 88]. Ils sont issus de travaux de la psychologie cognitive sur l'organisation de la mémoire. et trouvent des applications dans les connaissances à caractère linguistique [DUP 88].

Les relations entre les noeuds peuvent être quelconques, mais on distingue plus particulièrement les relations :

- IS A (est un),
- HAS PART (possède).

Les différents liens IS A permettent de représenter une hiérarchie. Ce qui est intéressant dans la notion d'héritage est que les entités se situant à des niveaux plus bas de la hiérarchie **héritent** des propriétés des noeuds qui sont d'un niveau hiérarchique supérieur. Cela permet à un concept particulier de posséder automatiquement les propriétés des concepts plus généraux dont il est issu [HAT 91] et évite ainsi la duplication d'éléments.

Les réseaux sémantiques permettent de structurer hiérarchiquement les bases de connaissance; structuration qui devient nécessaire lorsque celles-ci sont de grande taille. Ils s'appliquent bien à des domaines où les connaissances sont liées entre elles. Par contre ils sont inadaptés à la représentation de connaissances procédurales, quantifiées ou inexactes [QUE 91].

De nos jours, on rapproche souvent les réseaux sémantiques de la représentation à base de frames, plus largement utilisée.

C.3.2.2.5 Les frames et objets structurés

Les *frames* (schémas, prototypes) sont des structures qui regroupent de façon détaillée l'ensemble des connaissances relatives à un objet, un concept, une situation [HAT 91]. L'ensemble de ces prototypes constitue la base de connaissances. Les frames sont composés d'attributs appelés *slots* ou champs, représentatifs des propriétés et comportements relatifs aux objets (*instances*), concepts, situations qui sont décomposés en classes et sous-classes d'objets : une *classe* décrit une famille d'objets à l'aide de *variables* et de *méthodes*.

Les objets ainsi définis peuvent interagir en fonction des multiples *héritages* (partage de propriétés, variables, méthodes) qu'ils ont les uns des autres et des procédures qu'ils déclenchent au travers de leurs *scénarios* ou scripts, eux-mêmes objets (propagation de contraintes, raisonnement procédural, par classification et comparaison) [DUP 88, HAT 91, QUE 91].

C.3.2.2.6 Les réseaux de contraintes

L'énoncé d'un problème exprime souvent une quantité de contraintes qui sont des conditions, des impératifs à satisfaire sur un ensemble de données pour atteindre un but : résoudre le problème. Les réseaux de contraintes sont des moyens d'exprimer les connaissances dans un style déclaratif et sont constitués de variables sujettes à la résolution d'un ensemble de contraintes. La résolution de ces contraintes (symboliques ou numériques) consiste alors à attribuer une valeur à l'ensemble des variables de façon à trouver une solution parmi toutes celles qui existent qui satisfasse l'ensemble des contraintes du problème. Pour simplifier la résolution dont la quantité d'informations à traiter croît exponentiellement avec le

nombres de variables, un réseau de contraintes sera considéré, de façon plus locale, comme un ensemble de contraintes binaires (donnant vue sur les variables prises deux à deux) [CHI 91].

De nombreuses tâches d'I.A. peuvent être formulées comme des problèmes de satisfaction de contraintes (C.S.P. en anglais, pour Constraint Satisfaction Problem) : vision, systèmes de maintenance de la vérité, raisonnement temporel, planification, démonstration de théorèmes, compréhension du langage naturel [WIN 84].

C.3.2.2.7 Les listes

La représentation par listes est une des représentations les plus couramment utilisées en I.A. pour représenter des données symboliques. C'est d'ailleurs sous cette forme qu'elles sont représentées en LISP (LISt Processor), l'un des plus vieux langages de programmation (1958). Les symboles manipulables par LISP se rangent en deux catégories : les atomes (symboles ou nombres) et les listes (séquences ordonnées de taille variable composées d'atomes ou de listes) qui sont la structure de base du langage. Les symboles nomment les différents objets (données et fonctions) manipulés par un programme LISP, ce qui sous-entend que données déclaratives et procédurales peuvent être intégrées dans une même liste, liste qu'il est possible de représenter sous forme d'arborescence dont les feuilles sont étiquetées par les atomes qui la composent.

L'expression élémentaire de LISP est la *s-expression* (Symbolic EXPRESSION). Une *s-expression* est soit un atome, soit une liste ; de plus, chaque *s-expression* possède une valeur.

LISP fonctionne cycliquement de la manière suivante :

- lire une *s-expression*,
- évaluer cette *s-expression*,
- retourner la valeur de cette *s-expression*.

C.3.2.2.8 Une approche connexionniste : les réseaux neuronaux

L'approche privilégiée par les modèles connexionnistes s'intéresse au mode de représentation et de manipulation des connaissances dans le cerveau, à un niveau beaucoup plus élémentaire que ne le fait l'I.A. "classique" [PER 88].

Cette approche ne se base pas sur le choix de stratégies comme le font les systèmes experts, mais plutôt en fonction de l'expérience acquise et d'intuitions [DAV 89].

Contrairement aux autres modes de représentation, l'approche neuronale n'associe pas les connaissances à des structures autonomes (règles de production, objets, frames) : ici, la connaissance est délocalisée, elle ne correspond pas à un neurone spécifique, mais à une

famille de neurones. Et chacun de ces neurones se trouve impliqué dans la représentation de plusieurs concepts, dont le traitement peut se faire en parallèle et simultanément [PER 88].

Par rapport aux systèmes experts où le processus d'acquisition des connaissances est très long, les réseaux neuronaux artificiels sont capables d'apprendre automatiquement (acquisitions nouvelles ou remises en cause), à partir d'exemples (données brutes de bas niveau et élémentaires) [ABD 94].

Les principales qualités des réseaux neuronaux sont : le parallélisme, la capacité d'adaptation, la distribution de la mémoire (pas de case spécifique pour une information), la capacité d'apprendre automatiquement à partir d'exemples et de pouvoir généraliser cet apprentissage acquis [DAV 89].

Les domaines d'application privilégiés des réseaux de neurones artificiels sont : la reconnaissance des formes, le traitement du signal, la vision, la parole, la prévision, la modélisation, l'aide à la décision et la robotique.

C.3.2.2.9 Les systèmes utilisant des connaissances diverses

Les modes de représentation détaillés ci-dessus sont adaptés à des connaissances de nature bien spécifique. Or la connaissance peut être diffuse ou être constituée d'éléments ayant une grande interaction entre eux.. Dans une même application, il faudra à l'avenir envisager d'employer plusieurs modes de représentation et de raisonnement adaptés à ces connaissances, afin de bénéficier des avantages de chacun d'eux (ex : systèmes experts de seconde génération [DAVID 89]). On appelle communément système **hybride** un système qui permet d'utiliser des règles dans un environnement d'objets [BRI 88]. Se pose alors le problème de faire interagir et coopérer des structures dont les formalismes diffèrent. LOIR [MAC 89] est un langage prototype hybride spécialement conçu pour des applications d'enseignement et signifie : Lisp, Objets et Inférences Réflexes (modification de l'autoreprésentation que possède un système de lui même en cas de changement de celui-ci ou du système si c'est l'autoreprésentation qui change). Il contient différents types d'expressions (langage Lisp, représentations objet avec méthodes, héritage et démons et règles de production) pour donner plus de souplesse dans le mode d'implantation (procédural ou déclaratif).

WINA est un projet où des réseaux neuronaux et des systèmes experts sont intégrés conjointement par le biais de différentes méthodes [ULT 91b]. Les réseaux neuronaux contribuent à diagnostiquer des cas qui ne peuvent être résolus initialement par le système expert. Ces réseaux neuronaux produisent de nouvelles règles qui sont utilisées ensuite par le système expert suite à un apprentissage par exemples [KAN 93, DAL 94, ULT 91a].

C.3.2.3 Le raisonnement en Intelligence Artificielle [HAT 91]

Il existe différentes méthodes permettant de traiter les connaissances dans le but de résoudre un problème posé. Ces méthodes sont liées à la nature et à la façon dont sont représentées les connaissances.

Les principales méthodes de raisonnement sont les suivantes :

- le **raisonnement logique** : on applique des règles d'inférence déductives (*modus ponens*) ou inductives (*modus tollens*) [NIL 88, FAR 87] aux clauses ou aux règles de production (cf. C.3.3.2.2). Le raisonnement logique s'applique tout particulièrement aux expressions de nature booléenne,
- le **raisonnement incertain** ou approximatif, basé sur le raisonnement logique, permet d'évaluer des expressions dont la valeur n'est plus forcément vraie ou fausse : logiques multivaluée et floue, raisonnement probabiliste et possibiliste. Des notions d'*incertitude* et d'*imprécision* (presque, environ, peut-être, plutôt...) sont introduites dans la connaissance [SOM 89, BOU 93],
- le **raisonnement hypothétique** permet de compléter une base de connaissances lorsqu'elle est incomplète et qu'elle ne permet pas d'arriver au résultat recherché. Sachant qu'une hypothèse est révisable, elle peut représenter des connaissances incertaines ou évolutives,
- le **raisonnement temporel** est adapté à la conduite de procédés industriels ou à tout autre système dans lequel le temps joue un rôle important. Dans ces systèmes dynamiques, une base de faits se doit de garder ce qui est vrai aux différents stades d'évolution du processus en plus de ce qui l'est à l'instant présent en faisant intervenir le temps dans les connaissances, et en permettant de raisonner sur des événements futurs afin d'atteindre le but,
- le **raisonnement par analogie** consiste à interpréter une situation nouvelle en la comparant à une situation de même nature déjà rencontrée, donc en faisant référence à son expérience. L'analogie intervient fortement dans les activités cognitives humaines (apprentissage, prise de décision, explication, compréhension), fait l'objet de recherches importantes tant en psychologie cognitive qu'en intelligence artificielle, mais reste difficile à mettre en oeuvre dans les programmes d'I.A. [BAR 86]. Les représentations par frames ou objet sont très utilisées dans ce type d'approche car elles permettent de mettre en évidence et de retrouver les similitudes entre des situations ou des objets. Ce type de raisonnement est utilisé dans ARCHIMEDE (enseignement de la géométrie) [CHOU 88].

C.3.3 les Systèmes Experts

C.3.3.1 définition

Les systèmes experts sont des applications réalisées à l'aide de langages, de méthodes de formalisation de la connaissance (techniques d'I.A. [DUP 88]), et de logiciels permettant de les concevoir facilement : les générateurs de systèmes experts [HARM 87]. Les systèmes experts sont des systèmes qui simulent la représentation qu'un expert humain se fait d'un domaine limité [NIC 85] et des raisonnements qu'il produit pour résoudre les problèmes qui lui sont soumis (diagnostic médical, recherche pétrolière, gestion du personnel, résolution de problèmes combinatoires, ordonnancement, linguistique, rééducation adaptée, aide à la décision, simulation...). Parmi les S.E. les plus connus nous pouvons citer :

- DENDRAL. Ce système interprète des spectrographes de masse pour déterminer la structure d'une molécule, ainsi que ses composants atomiques,
- MYCIN. C'est un système qui diagnostique la méningite et les infections du sang en recommandant un traitement.
- PROSPECTOR. Ce système est utilisé pour la prospection des minerais; il aide à identifier les sites probables de bons gisements.

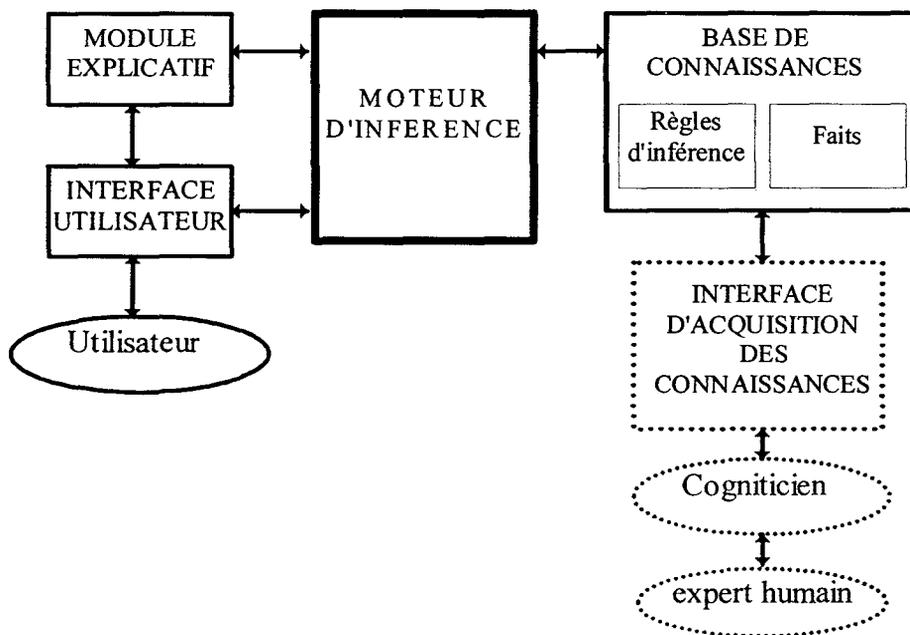


Figure C.2 : Les éléments constitutifs d'un Système Expert.

C.3.3.2 Les composantes d'un Système Expert

Pour réaliser un système expert il faut formaliser la connaissance de façon appropriée au langage utilisé. Une des particularités des systèmes expert est de séparer connaissances et

mécanisme de résolution [FAR 89]. Un Système Expert comprend donc principalement deux parties (figure C.2) :

- une **base de connaissance**, qui représente les connaissances (savoir et savoir-faire) de l'expert dans son domaine de compétence,
- un **moteur d'inférence**, dont le rôle consiste à appliquer cette connaissance à la résolution du problème donné.

C.3.3.2.1 La base de connaissance

La base de connaissance est constituée au long d'un processus d'acquisition au cours duquel la connaissance transmise par l'expert humain est modélisée et progressivement introduite dans le système [HART 88]. De plus, à tout moment, il est possible d'apporter au système des connaissances nouvelles sans remettre fondamentalement en cause l'ensemble déjà existant, ce qui n'est pas possible en programmation procédurale. C'est l'élément clé du système expert : Selon Feigenbaum, la puissance d'un S.E. réside plus dans la connaissance que dans la méthode d'inférence.

La base de connaissance comprend deux parties distinctes :

- La base de règles qui contient les mécanismes de résolution employés par l'expert, généralement décrits sous formes de règles de production facilement modifiables [BARK 88, LAU 83]. On suppose à ce sujet que :
 - l'expert raisonne à partir de règles qu'il est possible de transcrire dans le langage du S.E. C'est une hypothèse contraignante car il est très difficile de décrire le savoir acquis par expérience sous forme de règles [ULT 91b],
 - ce raisonnement acquis par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs experts est représentatif du raisonnement employé par l'ensemble de cette communauté,
- La base de faits qui contient les éléments descriptifs du problème.

C.3.3.2.2 Le moteur d'inférence

Le moteur d'inférence est le **composant essentiel du S.E.** Il est indépendant de la base de connaissances [LAU 88] et met en oeuvre des mécanismes déductifs (moteur en *chaînage avant*) ou inductifs (*chaînage arrière*), voire *mixtes* (chaînage avant et arrière), pour résoudre les problèmes décrits par les données contenues dans la base de faits [FAR 89]. Pour ce faire, le moteur d'inférences sélectionne, valide, et déclenche les règles contenues dans la base de règles jusqu'à résolution du problème ou jusqu'à ce que plus aucune règle ne puisse être déclenchée, entraînant alors un échec (non résolution du problème) [LAU 83].

C. 3.3.3. Systèmes Experts et pédagogie

L'utilisation d'un système expert pour la réalisation d'un système d'E.I.A.O. comporte un certain nombre d'avantages :

- **lisibilité** : la connaissance est matérialisée sous forme de règles SI...ALORS... directement accessibles à tous. La simple lecture des règles pouvant suffire à acquérir la connaissance,
- **adaptabilité et convivialité** : tous les raisonnements possibles que peut effectuer le S.E. n'ont pas à être prévus par son auteur, c'est le moteur d'inférence qui les invente après analyse des règles. Il utilise la logique humaine, s'adapte aux connaissances de l'élève et produit un dialogue naturel améliorant la relation Homme / Machine,
- **explication** : chaque déduction du S.E. comme chaque question de l'apprenant peut être justifiée par le système. L'explication est fabriquée en fonction du raisonnement employé, elle n'a pas à être programmée à l'avance,
- **cohérence** : si le raisonnement aboutit à une contradiction, le S.E. la détecte et l'explique à l'utilisateur. Le système contrôle donc la cohérence du dialogue en permanence,
- **retour en arrière** : l'utilisateur peut à tout moment revenir sur une action et la corriger sans que cela ne perturbe le raisonnement du S.E. (*backtrack*). Il réévaluera les informations et poursuivra en fonction de cette nouvelle situation : il ne reviendra pas au départ, n'oubliera rien et ne posera jamais deux fois la même question,
- **guidage** : en cas d'échec, l'utilisateur a la possibilité de visualiser toutes les déductions effectuées par le système et peut en tirer parti pour poursuivre son apprentissage,
- **souplesse** : un S.E. est opérationnel dès la première règle écrite. Sa mise à jour est aisée car réduite à la modification ou à l'ajout de règles claires. Cela permet de tester l'application au fur et à mesure sans remettre globalement le système en cause, en accord au passage avec la loi de Pareto qui dit que dans 80% des cas, l'expert utilise uniquement 20% de sa connaissance. Il est donc possible de maîtriser l'informatisation de pratiques pédagogiques, qui en informatique procédurale, nécessiteraient d'être complètement décrites avant toute exécution.

A la lecture de ces sept points, on constate que l'intérêt pédagogique des systèmes experts pour l'E.A.O. est grand, et plusieurs sont d'ailleurs utilisés secondairement à des fins de formation (ex : GUIDON). Ils fournissent un modèle de l'univers du problème, et

contiennent des possibilités de se confronter avec l'expert simulé. Les systèmes experts ne se contentent pas de fournir une réponse, mais sont capables d'expliquer pourquoi, en application de quel raisonnement ils l'ont produite. Il est possible de poser des questions de déduction à partir d'une situation donnée, comme d'interroger sur les situations menant à un résultat donné : combien de pédagogues rêvent d'un outil ayant les propriétés que nous allons explorer plus en détail dans la partie qui suit et qui est consacrée aux Tuteurs Intelligents.

C.4 Les Tuteurs Intelligents

C.4.1 Définition et objectifs des Tuteurs Intelligents

Un Tuteur Intelligent est un programme informatique qui utilise des techniques d'Intelligence Artificielle pour représenter la connaissance [CLA 87], permettant d'assurer de façon interactive et conviviale [NIC 88], un enseignement individualisé et adapté à chaque élève avec un maximum d'efficacité et dans un temps minimum [WEN 87].

Cela signifie que pour atteindre l'objectif d'apprentissage fixé au départ, il est impératif de prendre en considération des caractéristiques de l'élève telles que son état initial de connaissance, sa façon de raisonner ou son rythme de travail [GOU 91]. On peut ainsi dresser les qualités d'un tuteur idéal [SLE 82]. Celui-ci doit :

- avoir une connaissance bien définie et claire du domaine à enseigner, être capable de créer et de résoudre lui-même les problèmes qu'il pose sans qu'ils aient été programmés par avance [QUE 91]. Cela suppose qu'il soit un **expert** du domaine,
- individualiser, adapter l'apprentissage à l'élève, lui donner un rôle actif dans sa formation. Permettre à l'élève d'atteindre rapidement le niveau de connaissance souhaité en fonction du suivi du niveau de connaissance de l'élève et en ne lui présentant que les connaissances nécessaires, sans superflu ni hors sujet. Dans une activité de résolution de problèmes, le système doit être en mesure d'arrêter l'étudiant au moment opportun et de savoir quoi lui dire, comment lui dire afin que les conseils et encouragements qu'il prodigue à l'apprenant soient efficaces. Il lui faut donc faire preuve de capacités **pédagogiques** utilisées en fonction du **profil de l'élève**,
- être d'une **utilisation interactive et conviviale**. A ce titre, un dialogue clair, précis et non rébarbatif favorisant le langage naturel ainsi que des capacités graphiques et sonores (multi-média) doit s'instaurer entre la machine et l'utilisateur afin d'augmenter l'efficacité de l'apprentissage de l'apprenant.

C.4.2 La structure générale d'un tuteur intelligent

L'architecture d'un tuteur idéal (figure C.3) comprendra les quatre entités citées ci-dessus qui prendront le nom : d'**expert**, de **pédagogue**, de **modèle de l'élève** et d'**Interface Homme / Machine** [YAZ 86, NIC 88, HARM 87, TERK 90].

Pour Clancey [CLA 87], un Tuteur Intelligent peut être la combinaison de connaissances pédagogiques et d'un Système Expert se chargeant de l'expertise et la modélisation du patient.

L'émergence récente des Tuteurs Intelligents sur le marché est considérée par Gouardères [GOU 91] comme une mutation sociale, pédagogique et technologique.

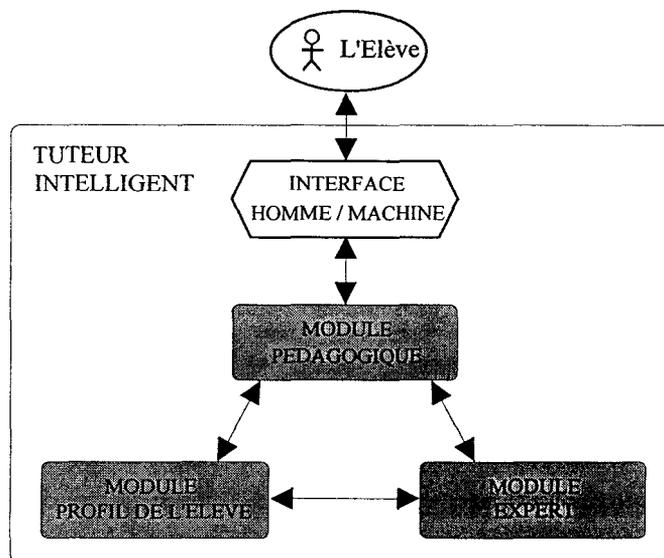


Fig. C.3 : L'architecture générale d'un tuteur Intelligent.

C.4.3 Les principales structures de tuteurs intelligents existantes

C.4.3.1 Introduction

Dans la pratique, il n'existe pas de modèle standard de tuteur, pas plus que de tuteur parfait ayant toutes les qualités qu'on peut en attendre. Chaque système d'E.A.O. a ses propres particularités liées au domaine, à l'apprenant ou aux objectifs visés. Ces considérations sont prises en compte dans les différents modules constitutifs d'un tuteur en fonction aussi de ce qui peut être réalisé concrètement et raisonnablement.

Yazdani [YAZ 86] a présenté trois structures de Tuteurs Intelligents représentatives d'une hiérarchie qu'il a établie en fonction du type de communication entre la machine et l'apprenant (figure C.4), ce que Nicaud et Vivet [NIC 88] appellent "les situations

d'apprentissage". Celles-ci se définissent vis-à-vis de l'initiative laissée respectivement au tuteur et à l'apprenant ; on trouve trois types correspondant aux structures évoquées :

- Situation où *l'élève a l'initiative*, correspondant aux **environnements d'apprentissage**,
- Situation mixte où *Tuteur et élève se partagent l'initiative*, appelée **enseignement guidé**,
- Situation où *le maître a l'initiative* et où l'apprenant exécute les tâches qui lui sont proposées. Les enseignements de ce type sont dits **directifs ou normatifs** et relèvent de l'E.A.O. traditionnelle.

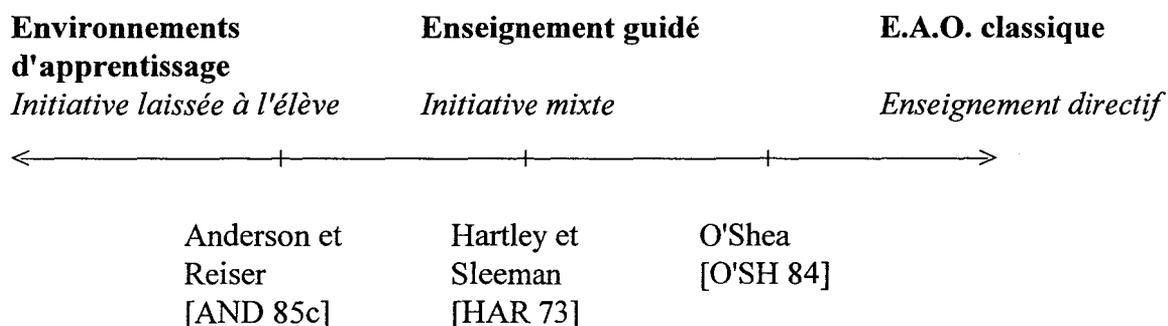


Figure C.4 Les situations d'apprentissage (d'après Yazdani [YAZ 86]).

C.4.3.2 Exemples de structures de Tuteurs Intelligents

Les exemples qui suivent correspondent aux trois situations d'apprentissage ci-dessus. Elles montrent la diversité des approches retenues pour l'élaboration d'un Tuteur Intelligent.

C.4.3.2.1 L'architecture d'Anderson et Reiser.

L'architecture décrite dans ce paragraphe est celle qu'ont employé Anderson et Reiser pour l'élaboration de deux tuteurs : LISP tutor [AND 85a] et GEOMETRY tutor [AND 85b]. Cette structure appelée A.C.T. (Advanced Computer Tutoring) comprend quatre éléments (fig. C.5) :

- un expert du domaine (modèle idéal) : ce module est capable de résoudre les problèmes soumis à l'élève,
- un *catalogue d'erreurs* : c'est une bibliothèque contenant les erreurs et incompréhensions couramment rencontrées chez les élèves dans le domaine d'application concerné,
- un *module pédagogique* : il contient la façon d'enseigner la matière à l'élève,
- une interface utilisateur.

L'architecture d'Anderson et Reiser comprend peu de stratégies pédagogiques et ne comporte pas de modèle de l'élève. Le pédagogue laisse l'initiative du dialogue à l'élève et ses actions sont comparées à celles du module expert considéré comme un élève idéal [AND 85c]. Tant que l'élève réagit correctement, le système reste muet. En cas d'erreur, le module pédagogique fait appel au catalogue d'erreurs, permet d'en identifier la cause et les messages envoyés par le tuteur via l'interface utilisateur soulignent l'emploi par l'élève de règles erronées ou déviant du modèle idéal afin de le remettre sur le chemin prévu par le module expert (fig. C.5) [AND 85c]. Si l'élève demande de l'aide, c'est également le raisonnement du modèle (expert du domaine) qui lui est fourni. Cette façon de procéder présente un inconvénient : si l'étudiant ne procède pas de la même façon que l'expert, son raisonnement sera considéré comme erroné [MOU 90].

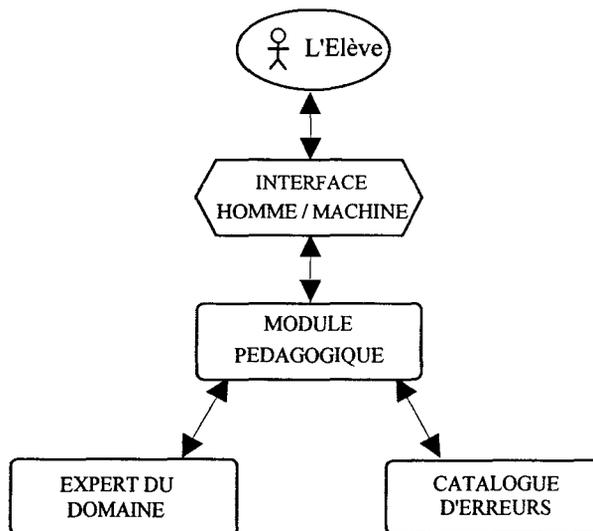


Figure C.5 : L'architecture A.C.T. d'Anderson et Reiser. [AND 85a, b, c].

C.4.3.2.2 L'architecture de Hartley et Sleeman

Hartley et Sleeman [HAR 73] ont suggéré qu'un Tuteur Intelligent devait comporter les bases de connaissance suivantes (fig. C.6) :

- un expert du domaine,
- un modèle (historique) de l'élève,
- une liste d'opérations pédagogiques,
- des *règles de guidage* qui font correspondre des décisions pédagogiques en relation avec le modèle de l'élève établi par le système.

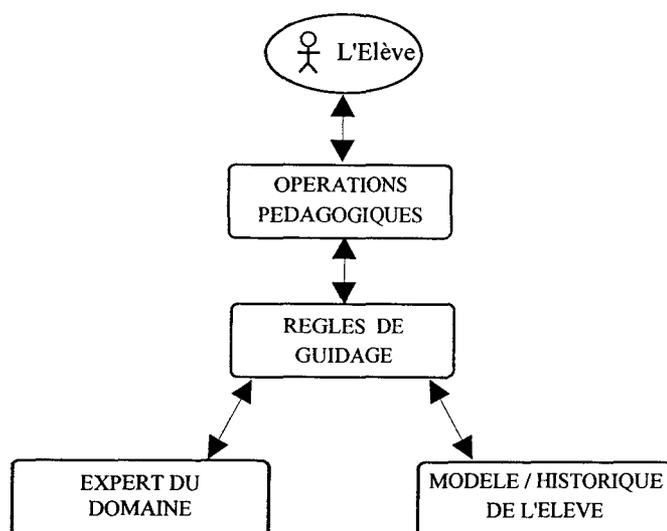


Figure C.6 : L'architecture de Hartley et Sleeman. D'après [NIC 88]

Si nous comparons cette structure à celle proposée par Anderson et Reiser, nous nous apercevons qu'il n'y a pas de catalogue d'erreurs. Hartley et Sleeman ont préféré introduire un modèle de l'élève propre à chaque apprenant, représentatif de la réalité et non pas une situation extrême où celui-ci est comparé à un modèle idéal d'apprenant (cf. III.4.2.2.1).

C.4.3.2.3 L'architecture d'O'Shea

L'architecture de O'Shea [O'SH 84] se base sur le modèle de Hartley et Sleeman [HAR 73]. Elle est totalement différente de celle proposée par Anderson. La structure proposée par O'Shea est un **cycle** comprenant cinq éléments (fig. C.7) :

- un *administrateur d'apprentissage* qui présente la matière à enseigner à l'élève et qui recueille ses réponses,
- un *historique de l'élève* qui réalise un enregistrement de ce qui a été présenté à l'élève et de ce qu'il a répondu,
- un *modèle de l'élève* qui fait des prévisions sur ses performances futures et représente son niveau de connaissance et ses capacités,
- des stratégies pédagogiques,
- un générateur d'exercices.

O'Shea intègre un modèle de l'élève (historique et modèle) et des stratégies pédagogiques comme l'ont fait Hartley et Sleeman. Par rapport au modèle d'Anderson, les rôles d'une représentation explicite du domaine et du catalogue d'erreurs sont amoindris au profit de l'accroissement de l'importance de comportements pédagogiques variés [YAZ 86].

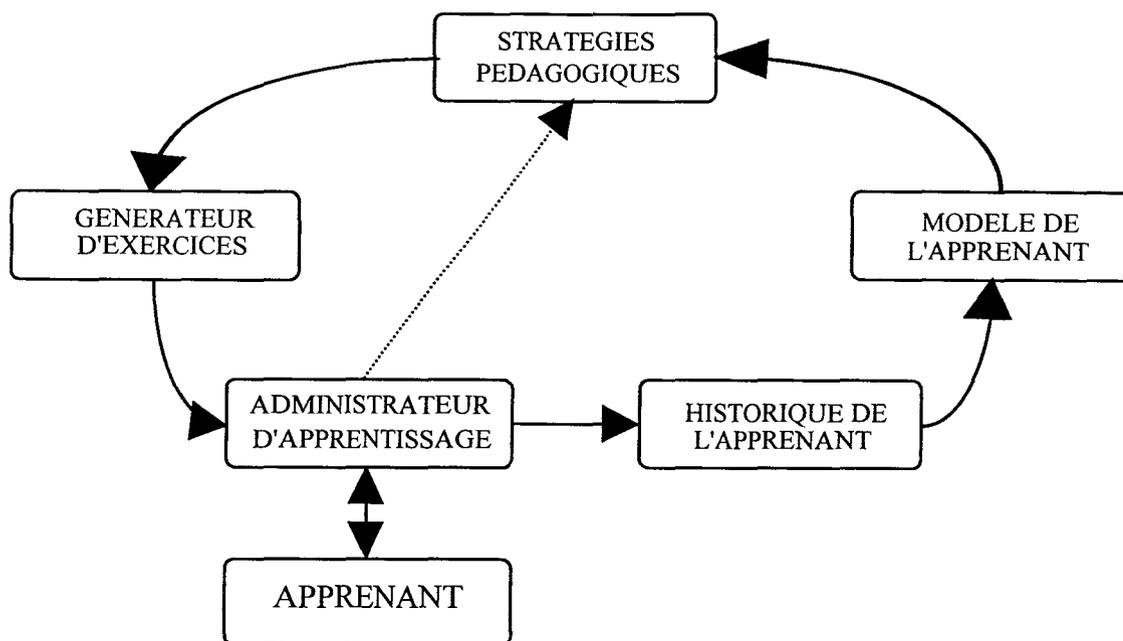


Figure C.7 : L'architecture cyclique de O'Shea. D'après [O'SH 84].

C.4.4 Les composantes d'un Tuteur Intelligent

C.4.4.1 Introduction

Après avoir pris connaissance de trois modèles architecturaux de base, nous allons maintenant détailler le contenu des principaux modules constitutifs d'un Tuteur Intelligent (cf. C.4.3) : l'expert, le modèle de l'élève, le pédagogue, l'interface de communication Homme / Machine. Traités individuellement, ces éléments ne sont pourtant pas indépendants les uns des autres, du moins en ce qui concerne l'expert, le pédagogue et le modèle de l'élève qui forment un tout. C'est pourquoi, une structure de Tuteur Intelligent est difficilement reproductible car étroitement liée à l'application pour laquelle elle a été conçue.

Ces modules sont souvent intégrés dans le logiciel à l'aide de langages d'I.A. traditionnels (ex : LISP, PROLOG) mais comme pour les systèmes d'E.A.O. classiques, il s'avère nécessaire que des environnements de développement ne nécessitant pas de connaissances en informatique soient mis à la disposition des personnes désirant réaliser des Tuteurs Intelligents [IBR 90], bien que cela soit difficilement envisageable [WAL 87].

C.4.4.2 Le module expert

Le module expert contient les connaissances liées à la matière à enseigner (savoir) et les mécanismes de raisonnement qui s'y rattachent (savoir-faire) [WOL 92]. Ce contenu dépend du domaine d'enseignement, de ce que l'on veut enseigner (diagnostic, résolution de problèmes, simulation...) [MOU 90], de l'importance accordée à l'explication [NIC 88]. C'est

cette connaissance qu'il faut transférer de la machine à l'apprenant, Cinq activités essentielles de l'expert se dégagent en liaison avec les objectifs pédagogiques :

- générer des problèmes (non résolus par avance). Selon les systèmes, cette génération peut aller d'exercices figés à des exercices paramétrables en fonction du profil de l'élève et des difficultés qu'il rencontre,
- résoudre les problèmes qu'il pose en utilisant si possible les stratégies employées par l'élève ou de façon à pouvoir comparer sa méthode et celle employée par l'élève. Cette résolution doit se faire par étapes afin de pouvoir débloquer la situation dans une phase intermédiaire,
- expliquer le raisonnement qu'il utilise et être en mesure de répondre aux questions de l'élève,
- vérifier les réponses de l'élève en sachant dégager les fautes classiques ou systématiques qu'il effectue pour déceler la faille se produisant dans le raisonnement employé par celui-ci.

Selon Nwana [NWA 90, NIC 88, DED 86], les modules experts peuvent être classés en fonction de l'étendue du raisonnement qu'ils sont capables de fournir. Cette classification va des systèmes appelés "*boîtes noires*" où seuls les résultats finaux sont accessibles jusqu'aux systèmes appelés "*boîtes de verre*" où chaque étape du raisonnement peut être inspectée et interprétée.

C.4.4.3 Le module élève

Le modèle de l'élève est une représentation dynamique des connaissances et savoir-faire que l'apprenant laisse entrevoir. Il fournit les informations nécessaires aux décisions prises par le module pédagogique [PAR 87, NWA 90]. La présence d'un modèle est essentielle si on veut individualiser et adapter l'apprentissage à l'élève. Donner à la machine les moyens d'établir un modèle cognitif de l'élève, c'est aussi lui permettre d'orienter ses explications et les corrections à réaliser en suivant le mode de pensée de l'élève afin qu'elles soient facilement compréhensibles et assimilables.

Un modèle parfait devrait intégrer tous les aspects du comportement et des connaissances de l'élève. Ces aspects ont une répercussion sur ses performances et son apprentissage, notions qu'il faut distinguer (cf. Annexe A). Une telle tâche est bien évidemment impossible, ne serait-ce que par les moyens de communication (clavier, souris) ou d'investigation trop restrictifs dont nous disposons. On peut cependant déceler des comportements tel que la motivation, l'ennui et l'attention dont l'influence sur l'apprentissage est très important [FOR 89].

Il existe une grande diversité de modèles de l'élève dans les Tuteurs existants. Chaque système tend à développer un modèle qui lui est spécifique, en fonction des autres composantes du Tuteur et de l'orientation pédagogique observée. En 1988, Self [SEL 88] a considéré que le modèle de l'élève comportait quatre éléments : P, C, T et H qui représentent respectivement :

- le niveau de connaissances **Procédurales** de l'élève,
- ses connaissances **Conceptuelles**,
- la personnalité ou les **Traits** caractéristiques de l'élève,
- l'**H**istorique établi à son sujet.

L'utilisation de ces quatre composantes permet d'établir :

- le modèle de la connaissance de l'élève à partir de P et C,
- le modèle psycho-pédagogique (T) de l'élève.

Dans ce même travail, Self a recensé vingt fonctions qui apparaissent dans les modèles de l'élève qu'il a classé en six catégories :

- les fonctions *correctives* dont le but est d'aider à supprimer les erreurs contenues dans les connaissances de l'élève,
- les fonctions *élaboratives* qui permettent de combler des connaissances correctes mais incomplètes,
- les fonctions *stratégiques* qui visent à modifier les stratégies employées par l'apprenant à l'inverse des deux points ci-dessus qui relèvent plus du savoir que du savoir-faire,
- les fonctions *diagnostiques* qui permettent de remettre en cause le modèle établi ou de valider les hypothèses formulées à son égard,
- les fonctions *prédictives* qui permettent de déterminer les réponses futures que l'élève est susceptible de fournir,
- les fonctions *évaluatives* qui permettent de faire une évaluation des connaissances de l'étudiant.

Certains tuteurs n'élaborent pas de modèle de l'élève, mais comportent dans ce cas, le profil de l'élève idéal auquel ils comparent les actions de l'apprenant.

C.4.4.4 Le module pédagogique

Le module pédagogique orchestre l'apprentissage en étroite liaison avec le modèle de l'élève et l'expert pour adapter les stratégies pédagogiques qu'il met en oeuvre et le dialogue qu'il entretient avec l'apprenant en fonction de sa personnalité, de ses connaissances et des

objectifs d'apprentissage fixés [NWA 90, SEL 88, NIC 85, NIC 88, QUE 91] : il faut mettre l'apprenant dans une situation d'apprentissage idéale à chaque instant en ne lui fournissant que les connaissances nécessaires [WOL 92]. Ce qu'on attend du pédagogue (cf. A.5) [NIC 88, NWA 90, DED 86] est :

- de n'enseigner que ce qui est nécessaire : des connaissances les plus utilisées à celles plus spécifiques (loi de Pareto) avec pour objectif prioritaire d'enseigner ce que l'élève réalise de façon erronée plutôt que ce qu'il ignore,
- d'employer des méthodes pédagogiques efficaces où la difficulté rencontrée d'un exercice à l'autre est progressive et tient compte des savoirs acquis précédemment. Pour chaque nouvel exercice, les connaissances nouvelles apportées par le didacticiel ne doivent pas être trop importantes,
- d'employer si possible les stratégies qu'utilise l'élève,
- de présenter des exercices variés en évitant de proposer de façon trop rapprochée ou trop souvent des exercices similaires,
- d'évaluer les performances de l'élève et lui offrir des révisions de façon régulière,
- de confirmer ou de revenir sur les hypothèses concernant l'élève et de mettre le modèle de l'élève à jour de façon dynamique,
- de présenter des messages permettant à l'apprenant de se sortir d'une impasse,
- de fournir, sans que cela soit systématique mais au bon moment : une aide, des conseils, des encouragements et des explications avisés.

Les différents types de modules pédagogiques peuvent être classés en fonction du niveau de guidage ou de liberté laissé à l'élève (situations d'apprentissage : cf. C.4.4.1, fig. C.4). Ces situations évoluent d'un environnement où le maître a l'initiative (enseignement directif) jusqu'à un environnement où l'élève a un contrôle total de l'activité [YAZ 86, NWA 90], en passant par une situation de dialogue mixte (questions et réponses) dans laquelle le système intervient aux moments opportuns [QUE 91].

Le type de situation d'apprentissage choisi lors de l'élaboration d'un tuteur dépend beaucoup de la nature des connaissances à transmettre et des personnes à qui elles s'adressent. Pour Nicaud et Vivet [NIC 88] : "les tuteurs de demain seront sans doute capables d'évoluer d'un mode à l'autre, en fonction du contexte pédagogique".

C.4.4.5 Le module de communication Homme / Machine

L'interface Homme / Machine est la composante qui permet au tuteur et à l'élève de communiquer de façon interactive. Elle transforme les représentations informatiques de la machine en messages compréhensibles par l'élève et vice versa.

C'est l'élément de référence qui permet à l'utilisateur de juger de la qualité du système. L'importance du soin apporté à l'ergonomie du tuteur ne doit pas être sous-estimée car toute forme de dialogue n'a d'utilité et n'apporte des résultats que si cette forme de dialogue est claire, précise, attrayante, facile d'emploi, non fatigante, etc. Mal conçue, l'interface Homme/Machine du tuteur peut être la cause d'erreurs ou de rejet du logiciel par ses utilisateurs.

La conception d'une interface utilisateur nécessite entre autres que :

- l'utilisation du logiciel soit simplifiée, aussi bien pour le débutant que pour l'utilisateur confirmé qui pourra bénéficier par exemple de raccourcis pour gagner du temps,
- l'information présente à l'écran soit efficace. Pour cela, il convient de respecter deux conditions. On veillera tout d'abord à faire en sorte que les messages soient faciles à comprendre pour éviter les erreurs d'interprétation : les instructions complexes doivent être décomposées en sous-instructions de base [SOMM 88]. On s'assurera également que les informations ne sont pas délivrées en excès : Miller [MIL 56] considère que l'être humain peut retenir jusqu'à sept (plus ou moins deux) éléments distincts d'information en mémoire à court terme (M.C.T.). Si une interface présente trop d'informations, toutes ne pourront pas être retenues en M.C.T.; certains éléments seront oubliés. Soulager la M.C.T. permet à l'utilisateur de transférer les informations en mémoire permanente (M.L.T.) [FOR 89], réservant la M.C.T. pour la résolution des problèmes posés en séquences courtes d'opérations par le tuteur [SOMM 88],
- le matériel linguistique employé (textes, mots-clés, icônes ou menus, etc...) soit adapté aux besoins et aux utilisateurs. L'utilisation du langage naturel n'est à l'heure actuelle pas envisageable sauf dans des cas bien spécifiques et limités [BIL 92]. Selon que l'on se place du côté de la machine ou de l'utilisateur, les organes de communication sont différents. La machine délivre des informations en utilisant son matériel audio-visuel (écran, parfois haut-parleur) : un environnement hypertexte ou multimédia permet de bâtir un système d'information bidirectionnel et intuitif entre le système et l'utilisateur qui marie du texte, des graphiques, de l'image fixe ou animée sur un même écran et d'y ajouter du son; avec une grande souplesse [MER 93, ALT 93, BOURS 94]. Les périphériques employés par les élèves pour communiquer sont les suivants : clavier, souris, écran tactile, crayon lumineux. Il faut que l'utilisation des périphériques soit adaptée aux utilisateurs de façon à simplifier le dialogue et limiter les erreurs de manipulation,

- les commandes et les menus aient tous le même formalisme d'un bout à l'autre du didacticiel [SOMM 88],
- la documentation qui l'accompagne (manuel ou aide en ligne [VIC 93] avec ou sans hypertexte [BEL 93]) prenne en considération l'ensemble des informations élémentaires dont à besoin le débutant de façon claire et précise.

C.5 Conclusion de l'Annexe C

Il existe une grande variété de systèmes d'E.I.A.O.. Chaque système est adapté à la résolution d'un problème particulier et n'est dans la plupart des cas **pas réutilisable**.

Quelque soit l'architecture choisie pour réaliser un tuteur, les problèmes liés à la représentation, la manipulation et la transmission des connaissances tournent autour de quatre axes principaux :

- l'expertise du domaine,
- les stratégies pédagogiques,
- la modélisation de l'élève,
- l'interface utilisateur.

Chaque système d'E.I.A.O. [SLE 82, KEA 87b, WEN 87, QUE 91] focalise son intérêt sur un ou plusieurs de ces axes, à des degrés différents, suivant l'approche retenue pour sa conception. La complexité de ces travaux montre combien il est difficile d'intégrer ces quatre points pour produire un système idéal et chacun utilise ses propres théories et sa propre méthodologie car il n'y a pas de standard en la matière.

Transposé à la rééducation des aphasiques, les problèmes posés prennent une autre dimension (cf. chapitre II). Le but, tout d'abord est différent. On ne cherche pas à apporter des connaissances nouvelles au malade mais on essaie de lui rendre ce qui a été perdu au moment de la survenue de l'aphasie. Ensuite, la modélisation de l'élève s'avère délicate, mais essentielle [MAS 90]. Elle ne s'exprime pas vraiment en termes de manques de connaissances par rapport à un élève idéal, mais plutôt en termes de comportements sources d'erreurs. Quelle que soit la méthode pédagogique adoptée (en rapport avec les méthodes de rééducation des aphasiques), le travail est très long car les progrès du malade sont lents et irréguliers. Ensuite, la communication avec le malade est difficile. Les troubles portent sur la compréhension et la production du langage, et sont variables d'un individu à un autre. A la simplicité des épreuves qu'on lui soumet, il faut adjoindre une simplicité du langage tenu avec le malade à qui on ne peut expliquer directement pourquoi il fait des erreurs. La conception de l'interface Homme-

Machine est à notre avis un autre point essentiel du tuteur. Il faut adapter les moyens de communications avec le malade (cf. II.3.1.5), sachant que son trouble est le langage, qu'on lui présente des exercices basés sur le langage et que le langage (écrit, oral ou gestuel) est nécessaire à toute communication avec lui.

