

Université Lumière Lyon II
Thèse de Doctorat
Spécialité : Sciences Cognitives. Mention : Neurosciences

***Effets "Top-down" lexicaux et
attentionnels sur la reconnaissance de
mots isolés en modalité visuelle.***

soutenue publiquement le 5 Décembre 2005
par Clara MARTIN

Membres du jury : - Mireille Besson, *CNRS Marseille* Rapporteur - Sylviane Valdois, *CNRS Grenoble* Rapporteur - Olivier Koenig, *Université Lumière Lyon II* - Guillaume Thierry, *University of Wales, Bangor* - Tatjana Nazir, *CNRS Bron* Directrice - Jean-François Démonet, *INSERM Toulouse* Directeur

Table des matières

..	1
Remerciements . .	3
Abstract . .	5
Résumé .	7
Chap 1. Introduction générale . .	9
A. Le langage humain . .	9
B. Langage et linguistique . .	10
Introduction à la linguistique – Historique . .	11
B.1. Phonétique et phonologie . .	13
B.2. Lexicologie .	14
B.3. Morphologie .	14
B.4. Syntaxe .	15
B.5. Sémantique .	15
B.6. Pragmatique . .	16
B.7. Prosodie . .	16
B.8. Ecriture et lecture . .	16
C. Langage et psycholinguistique . .	19
C.1. Historique .	20
C.2. Approche développementale en psycholinguistique : Acquisition du langage chez l'enfant. .	21
C.3. Traitement du langage chez l'adulte .	22
C.4. Conclusion .	41
D. Neuropsycholinguistique .	42
D.1. Introduction .	42
D.2. Historique et modèle neurologique du XIX ^e siècle .	43
D.3. Alexie et neuropsycholinguistique .	47

D.4. Limitations des méthodes de neuropsychologie .	48
D.5. La dyslexie développementale . .	49
E. Langage et neurolinguistique .	58
E.1. Principales techniques d'imagerie .	59
E.2. Corrélats neuroanatomiques du traitement de stimuli langagiers .	63
E.3. Comparaison des données d'imagerie aux modèles .	76
E.4. Résultats complémentaires : études de tractographie . .	80
E.5. Localisation des troubles dyslexiques .	81
E.6. Course temporelle du traitement de stimuli langagiers .	85
E.7. Dyslexie et déficits temporels d'activations (études en EEG et en MEG) .	91
F. Synthèse . .	93
Chap 2. Problématique générale . .	95
A. Postulat de départ . .	95
A.1. Processus de traitement visuel d'un mot .	95
A.2. Traitement des mots : effets "Top-down" .	96
B. Problématique . .	98
Chap 3. Matériel et méthodes .	101
A. Les Potentiels Evoqués .	101
B. Genèse des potentiels électriques de surface .	102
C. Enregistrement des différences de potentiel .	105
C.1. Les électrodes .	106
C.2. La référence . .	108
C.3. L'amplification du signal . .	108
C.4. Le filtrage .	108
C.5. L'enregistrement .	108
D. Obtention des Potentiels Evoqués .	109
D.1. Traitements préliminaires . .	109
D.2. Obtention des Potentiels Evoqués . .	110
D.3. Visualisation des Potentiels Evoqués .	110

E. Analyses statistiques .	111
E.1. Comparaisons de latences et d'amplitudes de pics . .	111
E.2. tests <i>t</i> en séries appariées .	112
F. Synthèse . .	112
Chap 4. Mise en évidence d'effets "top-down" lexicaux – Tâche d'identification de lettres ..	115
A. Introduction . .	115
A.1. Mise en évidence du lexique mental et des effets "top-down" lexicaux .	115
A.2. Le "Word Superiority Effect" . .	116
A.3. "Word Superiority Effect" et modélisation . .	117
B. Etude en Potentiels Evoqués des effets "top-down" lexicaux chez des adultes normo-lecteurs .	117
B.1. Présentation de l'étude . .	118
B.2. Hypothèses .	118
B.3. Matériel et Méthode .	119
C. Etude des effets "Top-down" lexicaux toutes positions de lettres confondues . .	122
C.1. Résultats .	122
C.2. Discussion .	128
C.3. Conclusion .	132
D. Effets "Top-down" lexicaux en fonction de la position du regard .	134
D.1. Résultats .	134
D.2. Discussion .	136
D.3. Conclusion .	138
E. Transfert interhémisphérique .	139
E.1. Introduction . .	139
E.2. Temps de transfert interhémisphérique .	141
E.3. Résultats .	142
E.4. Discussion .	144
Chap 5. Reconnaissance de mots : "Effets Top-down" attentionnels .	145
A. Introduction . .	145

A.1. Le soutien d'attention . .	146
A.2. L'attention sélective .	146
A.3. Problématique .	147
B. Paradigme expérimental et hypothèses .	147
C. Matériel et méthodes .	150
C.1. Participants .	150
C.2. Stimuli .	150
C.3. Tâche et procédure .	150
C.4. Acquisition et traitement des Potentiels Evoqués .	152
C.5. Analyses statistiques .	153
D. Résultats . .	154
D.1. Résultats comportementaux .	154
D.2. Présentation générale des résultats de PE .	157
D.3. Analyse 1 : PE après présentation du premier item . .	158
D.4. Analyse 2 : PE après présentation du second item, en condition de maintien d'attention .	163
D.5. Analyse 3 : PE après présentation du second item, en fonction du maintien ou du relâchement de l'attention . .	167
E. Discussion .	172
E.1. Effet de l' <i>attention sélective</i> sur la réalisation de la tâche de décision lexicale .	173
E.2. Effet de la <i>congruence</i> sur la réalisation de la tâche de décision lexicale .	176
E.3. Effet du <i>soutien de l'attention</i> sur la réalisation de la tâche de décision lexicale .	177
E.4. Observations complémentaires .	178
E.5. Résultats comportementaux . .	178
F. Conclusion .	179
Chap 6. Etude des effets "Top-down" lexicaux et attentionnels chez des adultes dyslexiques . .	183
A. Introduction . .	183
B. Dyslexie et effets "Top-down" lexicaux . .	183

B.1. Introduction . .	184
B.2. Matériel et méthodes .	184
B.3. Etude des effets "Top-down" lexicaux toutes positions de lettres confondues .	185
B.4. Etude des effets "Top-down" lexicaux en fonction de la position du regard . .	195
B.5. Conclusion .	199
C. Dyslexie et effets "Top-down" attentionnels . .	201
C.1. Introduction .	201
C.2. Matériel et méthodes .	203
C.3. Résultats .	203
C.4. Discussion .	215
C.5. Conclusion .	218
Chap 7. Synthèse des travaux . .	221
A. Discussion générale .	221
Différents stades de traitement des séquences de lettres. .	222
Décours temporel des différents stades de traitement. . .	223
Effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant le stade de traitement des traits visuels d'une séquence de lettres. . .	224
Effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant le stade de traitement des lettres d'une séquence linguistique. .	226
Effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant le stade de traitement des séquences de lettres. . .	227
Effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant le stade de catégorisation des séquences de lettres. . .	229
Effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant la charge attentionnelle allouée au traitement des séquences de lettres. . .	229
Traitement de séquences de lettres et effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant ce traitement, chez des adultes dyslexiques. .	230
B. Perspectives . .	232
Bibliographie . .	235
ANNEXES .	265
Annexe 1.1 : Modularité versus modèles interactifs .	265

Le postulat de modularité de Fodor . .	265
Les modèles interactifs (connexionnisme) . .	266
Annexe 1.2 : Principales régions cérébrales impliquées dans le langage .	266
Classification des aires corticales en fonction de leur caractère histologique (cytoarchitectonique) et fonctionnel . .	267
Annexe 4.1 : Liste des stimuli utilisés dans l'étude des effets "Top-down" lexicaux (présentée au chapitre 4) .	269
Annexe 5.1 : Liste des stimuli utilisés dans l'étude des effets "Top-down" attentionnels (présentée chapitre 5) . .	270

à Hugo,

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Tatjana Nazir pour son aide et son soutien depuis bientôt cinq ans. Merci à Jean-François Démonet pour sa confiance, ses réflexions intarissables, et son soutien scientifique et humain en toutes circonstances.

Je remercie Marc Jeannerod, Yves Burnod et François Chollet de m'avoir accueillie au sein de leurs laboratoires au cours de mes nombreux voyages toulouso-lyonnais.

Merci à Mireille Besson et Sylviane Valdois pour le temps passé à lire ce manuscrit. Merci à elles ainsi qu'à Olivier Koenig et Guillaume Thierry d'avoir accepté de faire partie de mon jury de soutenance.

Mes remerciements vont tout particulièrement à Guillaume Thierry, pour m'avoir accueillie dans son laboratoire, pour avoir le courage de prolonger cette collaboration l'an prochain, et pour toutes les raisons trop longues à énumérer qui font que je lui dois d'avoir achevé ce travail avec passion et acharnement.

Merci à Dominique Cardebat d'être toujours là qu'on ait besoin d'elle pour des problèmes scientifiques ou de tout ordre. Merci à Yves Paulignan pour son aide, principalement à avoir le sourire tout le long d'une journée de travail. Merci à Bernard Doyon pour son aide immense et nos discussions interminables et captivantes.

Un immense merci et toute ma reconnaissance à Irène, Denise, Emmanuelle et Sylvie pour leur aide et leur efficacité en toute circonstance, et surtout pour leur gentillesse et leur patience... Merci à Chantal, Nicolas, Eric, Sylvain pour leur aide très précieuse.

Merci à Gaëlle pour sa formidable amitié et pour tout ce qu'on a partagé, en espérant que la distance qui nous sépare (enfin !) après ces sept années de parcours "jumelé" n'y changera rien. Merci à Annabelle, la liste des raisons étant bien trop longue à énumérer... J'ajouterais même : "Je t'adore !" ;-). Merci à Antoine et Jérôme d'avoir fait de ma rédaction de thèse un de mes plus beaux souvenirs de vacances d'été ! Merci à "Nö-et-lui", seul hôtel au monde où on vous offre un cadeau à votre arrivée ! Mille mercis ne suffiraient pas...

Merci à Manu, Nadia et Flavie de m'avoir si vite et si bien intégrée à l'équipe de recherche la plus efficace dans son domaine. Merci à Yannick, Le Dav, Anthony, Antoine, Flavie, David et Nelly d'avoir fait de moi, contre toute attente, une championne de basket et de surf.

Merci à Méla, Chloé, EveÛlyneÛ, Nath, et tous les étudiants de l'U455 pour les apéros Garonne, les discussions philosophiques (ou moins)...

Merci à Nadia, Nath, Sonia et Véro de m'avoir accompagnée au sein de l'équipe de recherche la plus "féminine".

Merci à Seb, Chacha et Patrice pour les dizaines d'heures 'Super Pour Magouiller', et à Cyril pour les centaines d'heures 'Statistical Parametric Mapping'.

Merci à toute ma famille pour leur soutien, les inoubliables instants ardéchois, les cousineries mémorables... Merci particulièrement à mes parents et mes frères et sœurs pour ces trois années de bonheur et de soutien (et pour les 24 précédentes). Merci à Dominique et Bernard pour nos innombrables heures à refaire le monde.

Merci à Hugo, mon petit rayon de soleil durant les deux dernières années de cette thèse. Merci à tous mes amis lyonnais, toulousains, parisiens, montpelliérains et autres, de m'avoir

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

accompagnée durant ces trois ans, et d'être présents depuis si longtemps, en espérant que mon départ n'y change rien. Merci à Papinette, ça me ferait plaisir de parler pédagogie et didactique avec toi, même si j'ai peur de m'empierger dans une bloutte.

Merci à mon ange d'avoir fait de ma fin de thèse les plus beaux jours de ma vie...

Abstract

Orthographic processes that take place during visual recognition of letter sequences can be dissociated into three different stages activated in an interactive and parallel manner: visual feature analysis, letter processing and letter sequence processing. In order to define which processing stages are influenced by respectively lexical knowledge (lexical "Top-down" effects) and the load of attention required by a task (attentional "Top-down" effects), we performed two ERP studies comparing fluent readers and dyslexic adults.

For both subject groups, visual feature analysis of letter sequences (P1 peak) was influenced by gaze position in the sequence, but was independent of other factors, namely display duration, lexical and attentional "Top-down" effects. The letter processing (N1 peak) as well as the letter sequence processing (left-lateralized negative peak) were influenced by both "Bottom-up" effects (display duration and gaze position), and lexical and attentional "Top-down" effects; moreover interactions between these factors were observed. Results from dyslexic subjects differed from controls at both letter and letter sequence stages. They also differ in the "Top-down" effects that influenced these stages. Finally, these results suggest that these reading processes were automated in fluent readers but not in dyslexic subjects.

Résumé

Les processus de traitement orthographique mis en place lors de la reconnaissance visuelle de séquences de lettres peuvent être décomposés en trois phases activées de manière interactive et parallèle : le traitement des traits visuels, des lettres et des séquences de lettres. Afin de définir quelles phases de traitement sont influencées par les connaissances lexicales (effets "Top-down" lexicaux) et les conditions d'attention des sujets (effets "Top-down" attentionnels), nous avons réalisé deux études utilisant la technique des Potentiels Evoqués, et comparant des sujets adultes normo-lecteurs et dyslexiques.

Pour les deux groupes de sujets, l'analyse des traits visuels d'une séquence de lettres (onde P1) est influencée par la position du regard dans la séquence, alors qu'elle est indépendante du temps de présentation ainsi que des effets "Top-down" lexicaux et attentionnels. Les phases de traitement des lettres d'une séquence (onde N1) et de la séquence elle-même (onde négative latéralisée à gauche) sont dépendantes des facteurs "Bottom-up" de temps de présentation et de position de regard, des facteurs "Top-down" lexicaux et attentionnels, ainsi que d'un certain nombre d'interactions entre ces facteurs. Les sujets dyslexiques testés diffèrent significativement des sujets contrôles au niveau des stades de traitement des lettres et des séquences de lettres ainsi que des effets "Top-down" influençant ces deux phases. Par ailleurs, les trois stades de traitement des séquences de lettres sont automatisés chez les sujets normo-lecteurs, cette automatisation faisant défaut aux sujets dyslexiques.

Le cerveau est certainement l'organe humain le plus complexe, demeurant actuellement un des plus grands mystères dans la connaissance que nous avons du corps humain. Le cerveau est à la base des différentes fonctions cognitives supérieures telles que le langage, la mémoire, les émotions... Parmi ces fonctions cognitives, la faculté de langage est à la base de la connaissance et du raisonnement, qui différencient radicalement l'homme des animaux. Le langage peut être subdivisé en quatre facultés très différentes que sont compréhension et production du langage oral, et compréhension et production du langage écrit. Bien qu'utilisées dans le même but de raisonner et communiquer, ces fonctions cérébrales sont très différentes par nature, et impliquent donc des méthodes d'étude et d'analyse différentes.

Dans ce cadre général d'étude, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la compréhension du langage écrit, soit la lecture. La lecture se distingue des autres fonctions cognitives non seulement par sa spécificité à l'être humain, mais aussi par son apparition tardive dans l'évolution, il y a environ 5000 ans. L'étude de la lecture prend donc une importance toute particulière, et il est intrigant de comprendre comment une fonction mise en place aussi "tardivement" peut être aussi efficace quelques milliers d'années après. Bien que de nombreuses études aient été réalisées depuis une centaine d'années, la lecture est aujourd'hui encore mal connue.

Ce travail de thèse de doctorat se place donc dans la thématique de l'étude du langage, et plus particulièrement de la lecture. Nous avons choisi de baser notre travail de recherche sur la reconnaissance de mots isolés – capacité élémentaire indispensable à l'acquisition de la lecture – et plus particulièrement aux facteurs lexicaux et attentionnels influençant ce processus. Cette étude présente un intérêt particulier de par sa multidisciplinarité : nous avons étudié différents facteurs influençant la reconnaissance de mots selon une approche de psychologie

expérimentale, couplée à des enregistrements électrophysiologiques. Par ailleurs, ce travail basé sur l'étude de sujets adultes normo-lecteurs a été complété par une approche neuropsychologique en incluant des sujets adultes souffrant de dyslexie développementale.

Ce mémoire de thèse a pour but de rapporter les différents résultats obtenus au cours de nos trois années de recherche co-dirigées par Tatjana Nazir à l'Institut des Sciences Cognitives (CNRS, UMR 5015) de Bron et par Jean-François Démonet à l'unité INSERM U455 de Toulouse. Nous présenterons dans un premier temps l'état des connaissances actuelles sur le langage, selon les différentes approches de psychologie expérimentale et de modélisation, de neuropsychologie, de neuroimagerie et d'électrophysiologie. Nos différentes études portant sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle, la majorité des données de la littérature porteront sur ce sujet. Nous décrirons ensuite notre problématique ainsi que la technique électrophysiologique utilisée. Enfin, nous exposerons les différentes études réalisées pour ce travail de thèse de doctorat, détaillant pour chacune la revue de la littérature, la méthodologie, les résultats et discussions. Pour finir, nous présenterons une synthèse des différents travaux réalisés, et les perspectives de travail sur le sujet.

Chap 1. Introduction générale

Nous réaliserons dans cette introduction une revue d'ensemble de ce qu'est le langage, et plus particulièrement la lecture. Le travail de neurosciences cognitives présenté dans cette thèse se situe dans le vaste domaine d'étude des sciences cognitives, et se trouve ainsi au carrefour de nombreuses disciplines, des neurosciences aux sciences humaines. Nous ferons donc un tour d'horizon de ce que sont le langage et la lecture, de la linguistique à la neuroimagerie, en passant par la psychologie cognitive et la neuropsychologie. Nous décrirons plus précisément l'état actuel des connaissances sur la reconnaissance visuelle de mots isolés, ce qui servira de base théorique aux différentes expériences décrites dans les chapitres suivants.

A. Le langage humain

Nous aborderons dans ce mémoire le langage en tant que faculté de pensée et d'expression propre à l'espèce humaine. Dès lors, nous écarterons de notre champ de recherche tout ce qui a trait aux langages artificiels ou formalisés, découlant des mathématiques et de l'informatique. Nous écarterons aussi de notre champ d'étude les signaux de communication ou "langages" rencontrés dans d'autres espèces animales que l'espèce humaine, principalement du fait du caractère très limité de cette communication au regard du langage humain. Nous savons aujourd'hui que les abeilles, par exemple, ont

un système de communication, puisqu'elles sont capables de transmettre à leurs congénères des informations très précises sur la situation géographique des fleurs. Cependant, si une espèce animale possède un "langage", elle est incapable d'en apprendre un autre, comme elle est incapable d'innover à l'intérieur de son propre langage. Nous considérerons donc le langage comme une faculté spécifique à l'espèce humaine, et nous passerons en revue ses fondements biologiques, théoriques, ainsi que certaines de ses pathologies.

L'utilisation effective du langage requiert l'interaction de la mémoire avec les entrées sensorielles et les systèmes de sorties (d'exécution) motrices. Les principaux types de mémoire requis pour le langage sont phonologique (pour les sons des mots), orthographique (pour l'orthographe des mots), lexicale (pour la reconnaissance d'un mot) et sémantique (pour les connaissances sur le sens des mots). Les entrées sensorielles activant ces mémoires peuvent être des traitements auditifs (pour les mots entendus, les sons environnementaux et la musique), des traitements visuels (pour les mots lus, les objets, les visages et les gestes) ou des traitements tactiles (pour le Braille). Les sorties motrices permettent l'expression de concepts via l'articulation, l'écriture, la gestuelle ou encore le dessin ; ils peuvent être générés spontanément (en réponse à une pensée interne) ou guidés par un stimulus (en réponse à des mots lus ou entendus, ou à tout autre type de stimulation).

Ces différentes caractéristiques sont spécifiques au langage, mais il n'en est pas moins vrai que ces capacités fonctionnelles de "langage" correspondent à de nombreuses entités distinctes en tant que système de communication symbolique au sein d'une communauté humaine, les langues, dont l'étude découle du domaine de la linguistique.

B. Langage et linguistique

La linguistique est l'étude scientifique du langage et des langues naturelles. Elle a pour but d'expliquer la structure, l'évolution et le fonctionnement des langues. Cette première définition nécessite une mise au point sur un certain nombre de terminologies, entre autre une définition précise de ce qu'est une langue. La linguistique définit la langue comme un système de signes vocaux doublement articulés (voir paragraphe B.3), propre à une communauté linguistique donnée. Selon A. Martinet (Martinet, 1969) la langue est "*un instrument de communication selon lequel l'expérience humaine s'analyse, différemment dans chaque communauté, en unités douées d'un contenu sémantique et d'une expression phonique, les monèmes ; cette expression phonique s'articule à son tour en unités distinctives et successives, les phonèmes, en nombre déterminé dans chaque langue, dont la nature et les rapports mutuels diffèrent eux aussi d'une langue à une autre*". En fonction des emplois et des situations linguistiques, on définit différemment la langue, mais en la distinguant toujours de la parole et du langage. Le langage est une virtualité, une faculté inhérente, naturelle et spécifique à l'espèce humaine, et universelle. La langue est la manifestation, la concrétisation de cette faculté. Elle est particulière, propre à une communauté, à un groupe d'individus. Par rapport à la parole, la langue est

une abstraction alors que la parole est la matérialisation de cette abstraction. La langue est un code commun mais chaque locuteur l'utilise de façon particulière dans l'acte de parole.

Le monde contemporain compte de 7000 à 7500 langues, dont nous ne possédons les descriptions et grammaires que pour la moitié d'entre elles. Les autres sont souvent en voie d'extinction. Toutes les langues sont uniques et évoluent en permanence.

Introduction à la linguistique – Historique

L'Antiquité est la première époque où l'on trouve des théories du langage. Les Grecs n'avaient qu'un terme – *logos* – pour désigner le langage et la raison. Ainsi, dans l'Antiquité, une grande partie de la théorie du langage se trouve exprimée dans la discipline de la logique, afin de décrire rationnellement l'organisation de la pensée et la façon dont celle-ci se trouve exprimée par le langage. Les Latins, en traduisant *logos* par deux termes, *ratio*, qui est devenu "raison", et *oratio* – "oraison", ancien mot utilisé pour désigner à la fois la langue et le langage – ont commencé à dissocier les deux perspectives. Le lien étroit entre philosophie et grammaire qui caractérisait l'Antiquité continue à être observé pendant tout le Moyen âge, tant dans le monde chrétien que dans le monde arabe. Dans l'Islam, l'étude du langage est étroitement liée à la lecture du Coran et à l'effort qui doit être fait pour le comprendre. C'est pourquoi les penseurs arabes ont privilégié la dimension pragmatique¹ des énoncés, plutôt que leur sens immédiat. Les penseurs chrétiens du Moyen Age considèrent que le monde ne nous est pas accessible directement, mais que nous pouvons avoir des aperçus de son essence en étudiant le langage, qui en est le miroir (*speculum* en latin, d'où le nom de discipline de la "grammaire spéculative"). A la Renaissance va naître un intérêt grandissant pour les langues modernes, principalement le français, l'italien, l'espagnol, l'allemand et l'anglais, qui seront considérées comme des langues à part entière, et non plus comme des langues barbares² qui remplacent le latin en Europe. L'Age Classique (XVII^e – XVIII^e siècles) se caractérise par une conception du langage très différente de celle du Moyen Age. C'est l'époque de l'étude détaillée des langues européennes, mais aussi celle d'un questionnement philosophique nouveau sur l'"essence" du langage. Après la prédominance des grands mythes théologiques (Adam, Babel...), le langage se verra attribuer une explication purement humaine, en conjecturant qu'il est le fruit d'un besoin social ou de commerce, ou encore d'un désir d'exprimer ses émotions. Un peu partout en Europe apparaissent des méthodes d'apprentissage des langues, dans lesquels on retrouve les premiers concepts grammaticaux modernes. C'est aussi l'époque de la création, en Italie puis en France, d'académies destinées à améliorer la qualité des langues. A la fin du XVII^e siècle, plusieurs penseurs forment le projet de décrire les langues, non plus dans ce qui les différencie, mais dans ce qui les rapproche. C'est

¹ La pragmatique est l'élaboration de modèles permettant, à partir des informations contenues dans l'énoncé et d'autres fournies par le contexte, d'émettre des hypothèses sur l'intention du locuteur.

² Critère linguistique permettant de distinguer les individus et les langues n'appartenant pas à la civilisation grecque ; la définition a ensuite été étendue au monde romain.

l'époque de la *grammaire générale*. Au début du XIX^e siècle, le langage est abordé de manière radicalement différente avec un nouveau courant allemand. Herder propose que le langage n'ait pas comme origine le besoin de communiquer ou d'exprimer ses pensées, mais une prise de conscience de l'homme par lui-même. C'est en prenant conscience de lui-même que l'homme accède à la fois à la pensée et au langage. Par ailleurs, pour le philosophe Humboldt, le langage n'est pas un tout achevé, figé, il est une énergie en activité constante. Si la linguistique date du début du XIX^e siècle, c'est à la fin de ce siècle, après les grandes réalisations de la grammaire comparée³, que la linguistique va chercher à se constituer en discipline scientifique, grâce à un effort de théorisation et de conceptualisation des termes qu'elle utilise. Au début du XX^e siècle, Ferdinand de Saussure représente l'aube de la linguistique contemporaine européenne, en mettant en évidence les trois dichotomies du langage. Il met en avant les distinctions langue/parole (décrite précédemment), signifiant/signifié⁴ et synchronie/diachronie⁵. Saussure donnera naissance au mouvement structuraliste. Selon ce mouvement de pensée, les relations qui existent entre les éléments du système que constitue la langue sont des relations d'interdépendance : la valeur de chaque élément dépend de la valeur de tous les autres. De plus, il s'agit de relations entre signifiant et signifié, et non de relations entre signe linguistique et objet du monde représenté, extérieur à la langue. De nombreux mouvements, dérivant ou non du structuralisme, ont vu le jour au cours du XX^e siècle, jusqu'à la grammaire générative de Noam Chomsky (Chomsky, 1957; Chomsky, 1965). S'aidant de l'héritage de philosophes des siècles passés, comme Wilhelm von Humboldt, et des recherches menées dans d'autres disciplines que la linguistique, Noam Chomsky a fondé dans les années 60 la 'grammaire générative', théorie relevant autant de la philosophie du langage que de la linguistique. L'ouvrage référent de Chomsky, *Structures syntaxiques*, date de 1957 (Chomsky, 1957). Il y définit la grammaire comme l'ensemble fini de règles qui permettent de produire la totalité des énoncés grammaticaux possibles d'une langue donnée. Il distingue alors la connaissance des règles – la compétence – et la mise en pratique des règles – la performance. La grammaire qui regroupe l'ensemble des règles et instructions explicites qui permettent d'énumérer toutes les phrases grammaticales possibles d'une langue est dite *générative*. Après une deuxième version de la grammaire générative exposée dans *Aspects de la théorie syntaxique* (Chomsky, 1965), Chomsky propose en 1981 un nouveau changement théorique : selon lui, ce sont des principes universels qui organisent la grammaire, principes innés, communs à toutes les langues. La théorie grammaticale se charge de définir les paramètres qui caractérisent la manière dont les langues particulières mettent en œuvre ces principes. On parle alors

³ La grammaire comparée est un courant de la linguistique, datant du XIX^e siècle, postulant que les langues du monde s'organisent en grandes familles qui sont chacune cohérente et qui chacune développe des systèmes grammaticaux. En 1833, Bopp propose sa *Grammaire comparée des langues indo-européennes*, postulant qu'il a existé à un moment donné une langue mère – l'"indo-européen" – dont sont issus le grec, le sanscrit (langue sacrée de l'Inde), le latin et les langues germaniques.

⁴ La langue est constituée de signes linguistiques, qui se décomposent en signifié (concept) et signifiant (image acoustique).

⁵ La perspective diachronique est l'étude de la langue dans son évolution, la perspective synchronique est l'étude de l'état du système de la langue à un moment donné de son histoire. Saussure affirme la primauté de la perspective synchronique, ce qui met fin à la prédominance des études historiques.

des 'universaux du langage'.

La linguistique générale, théorisant les acquis de chacun des domaines dont elle se compose, estime que tout langage verbal humain fait s'articuler une phonologie, un lexique, une sémantique, une morphologie et une syntaxe. Ainsi, dans chaque langue, la compétence minimale requise est de : disposer d'un inventaire de sons, en connaître le système ; disposer d'un lexique ; savoir que certaines séquences de sons ont une signification, ou renvoient à un concept donné ; savoir que certaines phrases sont possibles et d'autres impossibles.

Nous allons maintenant préciser la nature des différents termes introduits précédemment (et qui seront utilisés tout au long du manuscrit), ainsi que les sous-domaines de la linguistique auxquels ils se réfèrent, en s'attardant plus longuement sur les domaines relevant de notre sujet de travail.

B.1. Phonétique et phonologie

La **phonétique** est l'étude des sons de la langue orale, en tant que phénomènes observables et quantifiables. Cette discipline ne s'intéresse aux sons du langage qu'en tant qu'unités langagières, c'est-à-dire différentes par essence des bruits de l'environnement. Les phonéticiens s'intéressent aux propriétés des sons eux-mêmes (phonétique acoustique), à la manière dont les sons sont perçus (phonétique auditive) et à la description physiologique de leur production (phonétique articulatoire). L'objectif de la phonétique est de classer les sons produits par la parole. A cette fin, elle a mis au point un alphabet phonétique international, datant de 1888, et révisé plusieurs fois au cours du XX^e siècle. Les sons du langage sont classés selon leur point d'articulation – essentiellement la position de la langue à l'avant ou à l'arrière du palais –, et en fonction de leur mode d'articulation – selon le degré d'ouverture des organes articulatoires (le pharynx, la glotte, la cavité nasale, les dents, les lèvres).

La **phonologie**⁶, discipline étroitement liée à la phonétique, est née avec Baudouin de Courtenay en 1880, et a reçu, dans les années 30, son statut scientifique définitif comme base de la linguistique structurale, grâce à Troubetzkoy. La phonologie est l'étude des sons en tant que signifiants d'un message dans une langue donnée, c'est-à-dire des nuances phonétiques déterminantes pour l'identification des mots d'une langue. La base de la phonologie est le phonème, plus petite unité sonore d'une langue donnée, ayant une valeur distinctive. Par exemple, le son [r]⁷ de '*radis*' sera différent selon qu'il est prononcé par un lyonnais ou un toulousain. Mais en aucun cas cette distinction de sonorité ne permet, en français, de distinguer deux mots différents : il n'existe donc qu'un phonème /r/ en français. A l'inverse, les mots '*pero*' ('mais') et '*perro*' ('chien') en espagnol se

⁶ La distinction entre phonétique et phonologie est importante : La phonétique s'intéresse à la manière dont les locuteurs d'une langue réalisent des sons. La phonologie s'intéresse à la manière dont chaque langue sélectionne, dans l'éventail de sons qui sont à sa disposition, un certain nombre d'entre eux, à partir desquels elle crée des phonèmes qui vont être pertinents dans son système.

⁷ En alphabet phonétique international, les sons sont notés entre crochets [r], et les phonèmes entre barres obliques /r/.

distinguent par deux sons [r] à valeur distinctive : il existe donc deux phonèmes /r/ en espagnol. Les langues et leurs stocks de phonèmes sont en perpétuelle évolution. Ainsi, en français, les deux phonèmes /a/ et /ɑ/ tendent aujourd'hui à n'en faire qu'un, et la distinction n'est plus réellement faite entre 'patte' et 'pâte'. De la même manière, de plus en plus de locuteurs aujourd'hui ne *distinguent pas le [õe] de 'brun' de celui de 'brin' [brɛ]*.

B.2. Lexicologie

La **lexicologie** est l'étude scientifique du vocabulaire. Son objet est la signification des éléments constitutifs du lexique d'une langue donnée. La lexicologie, comme discipline descriptive, a deux objets : le mot et le lexique. (a) Pour décrire le mot, elle s'organise en sémantique lexicale⁸ et morphologie lexicale⁹. La **sémantique lexicale** s'intéresse à la manière dont on peut décrire dans la langue les différents sens possibles d'un mot. La **morphologie lexicale** étudie la formation des mots, s'il s'agit de mots héréditaires ayant naturellement évolué, s'il s'agit d'emprunts, ou de mots construits (par dérivation d'un mot existant ou par composition de deux mots autonomes). (b) La lexicologie s'efforce également de décrire l'organisation du lexique, en définissant des *champs*. On distingue alors les *champs lexicaux* – qui rassemblent des mots de sens voisin –, les *champs sémantiques* – qui rassemblent les différents sens possibles d'un même mot –, et les *champs dérivationnels* – qui rassemblent les mots ayant une base morphologique commune. La lexicologie est une discipline étroitement liée à la lexicographie – désignant l'ensemble des techniques requises pour la rédaction d'un dictionnaire.

B.3. Morphologie

Le terme **morphologie** dérive du grec ancien *morphé* (forme) et *logos* (science). Etymologiquement, la morphologie est donc l'étude de la forme. Il s'agit, dans le cas de la linguistique, des différentes formes et variations sous lesquelles se présentent les signifiants d'une langue donnée. Le linguiste français André Martinet a mis en évidence le principe de double articulation du langage. La première articulation se situe au niveau des unités distinctives, non pourvues de sens, et qui permettent de différencier et d'opposer les signes sur la base de certains traits. Ces unités sont les phonèmes. La deuxième articulation se situe au niveau des unités qui associent forme et sens. Ainsi, les plus petites unités porteuses de sens dans une langue ont été baptisées monèmes, catégorie subdivisée en lexèmes et morphèmes. Les lexèmes, ou monèmes lexicaux, sont les unités de base du lexique (comme le mot 'plume' par exemple) et constituent les mots de 'classe ouverte', puisque de nouveaux mots apparaissent en permanence dans cette classe. Les morphèmes, ou monèmes grammaticaux, correspondent aux mots fonctionnels et aux marques grammaticales (pronoms, articles, conjonctions...) et définissent une 'classe fermée'. Les lexèmes sont souvent associés à des *morphèmes flexionnels* – marques de genre, nombre, temps etc. (comme 'age' dans 'plumage') et/ou

⁸ La sémantique lexicale est l'analyse du sens des mots et des relations de sens entre les mots.

⁹ La morphologie lexicale est l'analyse de la structure des mots et de leurs relations de forme.

à des *morphèmes dérivationnels* – qui permettent la création de mots nouveaux (comme ‘porte-’ dans ‘porte-plume’). La morphologie correspond à l’étude des règles de combinaison des monèmes les uns avec les autres. Les variations morphologiques concernent la conjugaison, les désinences de genre, nombre et cas, les adjonctions de préfixes et suffixes ou encore la formation de mots composés.

Penchant d’un côté vers la lexicologie lorsqu’elle étudie la formation des mots, la morphologie empiète aussi sur le territoire de la syntaxe, ce qui conduit souvent à parler de **morphosyntaxe**. Ce cas est une illustration du flou des frontières entre les différentes disciplines de la linguistique. Aucune des disciplines décrites précédemment ou ci-dessous n’est parfaitement définie, et toutes se confondent avec d’autres, rendant parfois assez complexe l’utilisation de termes parfaitement appropriés.

B.4. Syntaxe

Les mots n’apparaissent pas isolés dans le discours. Ils se combinent pour former des unités linguistiques plus grandes, le syntagme¹⁰ et la phrase¹¹. La **syntaxe** tente d’expliquer selon quelles règles les mots se combinent pour former des phrases grammaticales. La syntaxe est la discipline qui régit l’ordre des mots dans la phrase, ainsi que la façon dont chacun doit être accordé. Cette dernière branche de la discipline, la **syntaxe d’accord**, faisant intervenir les catégories grammaticales des mots et leurs relations, relève à la fois de la morphologie et de la syntaxe, il s’agit donc de la **morphosyntaxe** introduite dans le paragraphe précédent.

B.5. Sémantique

La **sémantique** est traditionnellement définie comme la science ou la théorie du sens dans le langage. On parle de *sémantique lexicale* lorsque celle-ci s’attache à définir le sens d’un mot. Ce travail est primordial puisque la plupart des mots sont polysémiques, c’est-à-dire qu’ils ont plusieurs sens. L’étude de la sémantique d’une phrase est très importante aussi puisqu’il est rare que nous communiquions le sens à l’aide des seules unités de langage que sont les mots ou les morphèmes. S’il est évident que la construction d’une phrase est régie par des règles syntaxiques, elle l’est aussi par des règles sémantiques. Ainsi, par exemple, la phrase "*Ma sœur est mon seul enfant*" est grammaticalement correcte, mais elle est pourtant aberrante, ne respectant pas les propriétés sémantiques des mots assemblés, ce qui incline à identifier cette phrase comme un énoncé métaphorique. La sémantique doit aussi prendre en compte le sens à

¹⁰ Un syntagme (du grec *syntagma* qui signifie ‘chose rangée avec une autre’) est une suite de morphèmes, formant un segment d’une phrase, qui peut être commuté. Par exemple, dans la phrase "*Le mari de ma cousine prend l’avion*", "*Le mari de ma cousine*" peut commuter avec "*Il*" – c’est un syntagme nominal – et "*prend l’avion*" peut commuter avec "*voyage*" – c’est un syntagme verbal.

¹¹ Du point de vue morphosyntaxique, la phrase est une suite de mots ordonnée, généralement organisée autour d’un verbe, selon un certain nombre de règles. En se basant sur la fonction de la phrase dans le discours, on peut la définir comme étant une unité linguistique de communication.

l'échelle du discours, tenant compte des effets d'ambiguïté ou de sens implicite d'un énoncé.

B.6. Pragmatique

La **pragmatique** – développée à partir des travaux de Austin (1955) – est une discipline intégrant le locuteur et le contexte aux modèles d'explication du langage. Par exemple, si Antoine entre dans une pièce dont la fenêtre est ouverte et dit à Annabelle "*Il ne fait pas chaud ici*", la réaction d'Annabelle ne sera pas la même selon qu'elle suive une approche sémantique ou pragmatique. L'analyse sémantique repose sur le principe que le langage décrit la vérité ; elle étudie le sens et les conditions de vérité de l'énoncé pris hors contexte. Ainsi, si la proposition d'Antoine correspond à la réalité, Annabelle pourra répondre "*Oui, tu as raison*". Mais selon une approche pragmatique, Annabelle pourra comprendre le message implicite de la phrase, et l'intention qu'avait le locuteur en disant cette phrase, compte tenu du contexte, et sa réponse sera alors de fermer la fenêtre. La pragmatique élabore un modèle qui explique comment, à partir des informations contenues dans l'énoncé, et d'autres fournies par le contexte, le destinataire émet des hypothèses sur l'intention du locuteur.

B.7. Prosodie

Nous avons vu que la phonologie est une discipline dans laquelle la chaîne parlée est découpée en unités analysées séparément. La **prosodie** – ou étude de l'intonation – étudie les modulations acoustiques du langage parlé qui en dépassent le niveau des unités ou segments élémentaires de la parole (phonèmes, syllabes), pour s'intéresser à des variations "supra-segmentales", à savoir les phénomènes de variations d'accentuation, de rythme, de hauteur vocale etc. On définit communément la prosodie comme la musicalité du discours ; elle peut être liée à la structure grammaticale de la phrase (phrases interrogatives, exclamatives,...) ou à l'expression d'émotions dans le langage parlé.

B.8. Ecriture et lecture

B.8.a. Ecriture

Avant toute chose, il est important de remarquer que le langage oral est une capacité innée de l'homme, génétiquement programmée sur le plan neuronal au même titre que le sont ses capacités phonatoire et auditive. Il faut donc considérer tout à fait à part l'écriture, qui est une technologie à dimension culturelle élaborée et entretenue volontairement par les communautés humaines qui en jouissent. L'écriture est un mode de communication qu'utilisent les hommes pour matérialiser leurs pensées, fixer la parole fugitive selon l'adage : *verba volant, scripta manent*. Par l'écriture, les peuples consignent leur histoire, véhiculent leur culture, leur littérature, leur science.

Le terme 'écriture' rassemble aujourd'hui tout système visuel permettant de représenter le langage articulé. Il existe deux grands principes de notation : la représentation directe des objets et des idées – la pictographie –, et la représentation de leur traduction dans le langage – la phonographie.

La pictographie

La pictographie consiste à représenter l'objet que le langage évoque au moyen d'une image – le pictogramme (le code de la route par exemple). On parle d'idéogramme lorsque le pictogramme renvoie à un concept (alphabets chinois et japonais).

De la pictographie à l'écriture alphabétique

Beaucoup de systèmes d'écriture ont commencé par être des répertoires de pictogrammes ou d'idéogrammes. Puis, une stylisation s'est instaurée, phénomène très étudié dans l'évolution de l'écriture cunéiforme – l'une des plus anciennes écritures du monde, qui commence à apparaître vers 3000 avant J.-C. en Mésopotamie. Cette écriture était conçue comme un système d'idéogrammes, puis ses dessins se sont peu à peu simplifiés jusqu'à se présenter comme des combinaisons de petits clous (*cuneus* en latin, d'où le nom de l'écriture). Ces assemblages de clous ont fini par ne plus signifier des objets ou des idées, mais des mots du discours, voire des syllabes, provoquant un glissement vers l'écriture alphabétique.

C'est vers 850 avant notre ère qu'apparaît un alphabet consonantique phénicien de 24 signes qui aura une incidence capitale dans l'Histoire de l'humanité, puisqu'il sera repris, avec quelques modifications, par les Arabes, les Hébreux, les Romains et les Grecs – ces derniers inventant la notation des voyelles. C'est la naissance de la notation alpha-bétique, où chaque symbole représente un son et un seul. Certains spécialistes considèrent, bien que la question soit encore débattue, que l'invention de l'alphabet n'a eu lieu qu'une fois dans l'histoire, et que tous les systèmes alphabétiques du monde dérivent de l'alphabet grec. Plus récemment apparaissent des systèmes dérivés comme la sténographie moderne – formalisée à la fin du XVIII^e siècle par l'anglais S. Taylor –, l'alphabet des sourds-muets mis au point par l'Abbé de l'Épée vers 1780 ou l'alphabet tactile de Louis Braille au XIX^e siècle.

La phonographie

Le fait que tous les mots du japonais puissent être représentés par un ensemble d'une centaine de syllabes environ les a poussés à installer en parallèle de leurs idéogrammes – le système *kanji* – un second système, syllabique celui-là, le système *hiragana*. La plupart des langues européennes comprennent un nombre de syllabes trop important pour que le système syllabique soit possible, et elles se sont donc accommodées du système alphabétique.

L'orthographe

Dans la chaîne parlée, on peut définir des unités distinctives minimales, les phonèmes (cf.

chapitre B.1). De même, dans la chaîne écrite, on pourra définir des unités minimales appelées graphèmes. Les graphèmes peuvent être des lettres, des lettres accentuées ou pourvues d'un signe auxiliaire (le 'c' cédille (ç) par exemple), ou des groupes de lettres (*gu* dans 'guépard' par exemple). Le principe de l'orthographe repose sur la recherche d'une équivalence entre un système de graphèmes et le système des phonèmes de la langue. Selon le linguiste V.G. Gak, l'orthographe répond à cinq critères principaux. (1) Outre le principe phonétique décrit précédemment, il recense : (2) le principe morphologique qui explique que certains graphèmes comme le *s* par exemple ont des significations morphologiques (marque du pluriel) alors même qu'ils ne sont pas prononcés. (3) Le principe différentiel permet de distinguer des homonymes ('sceau', 'sot' et 'seau' par exemple). (4) Le principe traditionnel explique que, une fois une convention adoptée, il est difficile d'en changer alors même que la correspondance phonèmes/graphèmes évolue. (5) Enfin, le principe étymologique propose que certains graphèmes n'aient pas d'autre but que de marquer l'étymologie du mot dans lequel ils s'inscrivent. Ces deux derniers principes expliquent pourquoi, par exemple, on s'est attaché en français à conserver la lettre 'c' (qui avait pour unique équivalent phonique le [k] en latin) dans des situations où elle peut être prononcée de manières différentes ('cirque', 'champ', 'coupe'...).

Si l'on considère l'histoire du français, on constate que l'orthographe a eu tendance à se fixer – particulièrement à partir de l'invention de l'imprimerie au XV^e siècle – alors que la prononciation évoluait rapidement. Ainsi, l'orthographe du français est très loin, aujourd'hui, de représenter le système phonologique de cette langue. Par exemple, certaines lettres ne correspondent à aucun son (le *h* par exemple), des phonèmes peuvent être écrits de plusieurs manières (le phonème /in/ peut être écrit *in*, *ein*, *ain*...), un grand nombre de mots sont écrits de façon purement étymologique sans rapport avec leur prononciation, etc.

B.8.b. La lecture

La lecture est l'activité cognitive de décodage des symboles écrits de l'écriture. Dans le système d'écriture alphabétique, auquel appartiennent les langues indo-européennes, la lecture implique plus précisément l'intégration de plusieurs symboles visuels – les lettres – organisés en séquences – les mots. Il s'agit d'un acte de langage tant dans sa dimension sociale (communication) que dans sa dimension interne (pensée et intelligence verbale). La lecture implique des mécanismes cérébraux très complexes, en faisant intervenir des processus sensoriels, perceptifs, attentionnels, mnésiques, cognitifs et linguistiques élaborés – certains étant conscients, volontaires ou involontaires, d'autres automatiques ou inconscients. Par ailleurs, la lecture fait l'objet d'un développement s'inscrivant dans le développement psycholinguistique et cognitif, en passant par une phase nécessaire d'apprentissage.

De même que l'écriture est une invention humaine récente, la lecture – qui apparaît en même temps que l'écriture dans l'évolution – est une faculté cognitive inventée par l'homme, suffisamment récemment pour ne pas avoir subi les contraintes évolutives. Le caractère très récent de son invention dans l'histoire de l'humanité contraste avec le fait

que cette faculté cognitive acquise est d'une efficacité et d'une rapidité d'exécution remarquables chez les sujets 'normo-lecteurs' : en dépit de la complexité de cette tâche, un lecteur est capable de reconnaître un mot de plus de 20 lettres en un seul regard de 100 ms (voir (Nazir and Montant, 1996)). L'automatisation à laquelle aboutit l'apprentissage de la lecture a d'ailleurs permis d'observer un effet très robuste en psychologie – l'effet Stroop – démontrant que l'accès automatisé au nom écrit d'une couleur peut interférer avec l'accès, moins immédiat, au nom de la couleur de l'encre ayant servi à écrire ce même mot.

La lecture est donc une faculté cognitive très particulière, dont nous avons choisi d'étudier différents aspects, les résultats obtenus étant présentés dans cette thèse.

Après avoir décrit succinctement les grandes lignes de la linguistique, nous allons maintenant décrire plus particulièrement trois disciplines découlant des sciences du langage, et qui s'intéressent au langage en tant que faculté cognitive, avec ses contraintes psychologiques et biologiques. La description de ces trois disciplines se fera séparément, mais nous verrons qu'elles sont hautement complémentaires, l'intérêt des travaux en sciences cognitives étant de coupler les connaissances de ces différentes disciplines. Nous présenterons tout d'abord les principaux travaux de psycholinguistique, étude des processus psychologiques déterminants dans l'élaboration du langage. Nous décrirons ensuite la neuropsycholinguistique – étude des aspects pathologiques du langage – permettant de traiter au mieux les troubles des patients, mais aussi de mieux comprendre la mise en place du langage chez les sujets 'sains'. Enfin, nous nous attarderons plus longuement sur les résultats primordiaux de la neurolinguistique, qui étudie les fondements biologiques de notre aptitude au langage, discipline en plein essor grâce à l'apparition à la fin du XX^e siècle de nouveaux outils d'expertise. Dans chaque chapitre, nous nous attarderons plus longuement sur les aspects de la reconnaissance visuelle de mots isolés (l'aspect de phrase ou de discours n'étant pas abordé dans ce travail de recherche), ainsi que sur la pathologie de la lecture qu'est la dyslexie de développement.

C. Langage et psycholinguistique

L'étude des processus psychologiques par lesquels les sujets humains élaborent et mettent en œuvre le système de leur langue constitue le domaine de recherche de la psycholinguistique, ou psychologie cognitive appliquée au langage. Cette discipline est née en 1954 à l'Université de Cornell, aux Etats-Unis, fondée par C.E. Osgood et T.A. Sebeok, rassemblant des linguistes et des psychologues désireux de définir un champ de recherche commun. Les opérations impliquées dans la compréhension ou la production des messages verbaux ne sont en général pas directement accessibles à la simple observation ni à l'introspection. Pour les analyser, la psycholinguistique dispose principalement de deux voies d'approche :

(1) l'étude expérimentale du traitement du langage chez l'adulte, qui permet de distinguer et manipuler des variables et d'en déduire certaines lois d'organisation des

conduites langagières ;

(2) l'approche développementale centrée sur l'acquisition du langage chez l'enfant, qui permet de découvrir certains ordres d'acquisition et d'en déduire des niveaux de complexité.

Basée sur les principes de la psychologie expérimentale (étude des taux d'erreur et des temps de réaction d'un sujet dans une tâche donnée), la psycholinguistique a permis l'élaboration de modèles cognitifs de compréhension et production du langage. Après avoir retracé brièvement l'historique de la psycholinguistique, nous passerons en revue l'état de l'art concernant le traitement du langage chez l'adulte normo-lecteur, en développant principalement les connaissances sur le langage écrit, sujet d'étude de cette thèse. Nous n'aborderons que succinctement les aspects d'apprentissage de la langue chez l'enfant.

C.1. Historique

Les premières études de psycholinguistique étaient basées sur le **behaviorisme**, fondé en 1924 par Watson, définissant la psychologie expérimentale comme l'étude du comportement observable. Cette approche a très rapidement montré ses limites en terme de méthode d'investigation des fonctions cognitives. En effet, dans la perspective behavioriste, le langage est réduit à n'être qu'un ensemble de réponses verbales associées à des situations types, selon le schéma stimulus-réponse caractéristique du réflexe conditionné. Cette approche ne peut rendre compte de la spécificité de l'activité langagière dont le propre est d'être productive et structurée. La seconde époque de la psycholinguistique va ensuite débiter, dominée par le **modèle chomskiste** de la grammaire générative (voir paragraphe B. Introduction à la linguistique). Les travaux de Chomsky vont constituer tout au long des années soixante la base quasi exclusive des travaux de psycholinguistique. A partir des années soixante-dix, la psycholinguistique de 'troisième génération' va réagir contre la domination du modèle générativiste, et se donner comme objectif de construire des modèles psycholinguistiques de manière plus intégrée à l'étude des processus cognitifs, en analysant le traitement du langage en liaison avec d'autres systèmes cognitifs tels que perception, mémoire ou raisonnement. A travers la diversité des objets (syntaxe, sémantique, pragmatique...), ainsi qu'à travers la diversité des modèles (modularité ou connexionnisme ; cf. Annexe 1.1), l'approche basée sur le traitement de l'information s'est progressivement imposée. Aujourd'hui, la psycholinguistique s'attache à déterminer la nature et le mode de fonctionnement des opérations mobilisées dans le traitement des différents composants du langage, phonologique, lexical, syntaxique, sémantique ou pragmatique. Ces différents niveaux de l'analyse correspondent-ils à des unités de traitement distinctes, 'processeurs' autonomes ou non, hiérarchisés ou non ? Ces unités de traitement fonctionnent-elles de façon séquentielle (en série), ou bien de manière interactive (en parallèle), chaque composant communiquant au fur et à mesure ses résultats à tous les autres, directement ou par l'intermédiaire d'un processeur central ? Dans quelle mesure les processus de traitement du langage sont-ils automatiques ou au contraire contrôlés ? Sont-ils des formes particulières des processus cognitifs généraux, ou bien engagent-ils des mécanismes

spécifiques relevant de dispositifs spécialisés ? Telles sont les questions principales qui se posent actuellement à la recherche en psycholinguistique. Pour y répondre, de nombreuses techniques d'expérimentation ont été développées. Dans l'étude des niveaux supérieurs de traitement, les méthodes les plus classiques, dites 'off-line', explorent le produit du traitement résidant en mémoire à court ou à long terme : des tâches de rappel, de reconnaissance, de complétion de phrases, de jugement sémantique ou syntaxique, etc sont utilisées. Parallèlement, les techniques d'analyse en temps réel ('on-line') se sont récemment beaucoup développées. S'appuyant sur des mesures chronométriques très précises, elles donnent accès aux procédures de traitement au moment même où elles s'effectuent : tâches de décision lexicale (temps que le sujet met à déterminer si un stimulus est un mot ou non), 'shadowing' (répétition immédiate d'un message), détection d'erreurs, etc. A ces méthodes de psychologie expérimentale sont venues s'ajouter des mesures physiologiques telles que les mouvements et fixations oculaires, les mesures électroencéphalographiques comme les Potentiels Evoqués (cf. paragraphe E.6), ou les techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle (cf. paragraphe E.2).

C.2. Approche développementale en psycholinguistique : Acquisition du langage chez l'enfant.

C.2.a. Introduction

La psycholinguistique développementale, axée sur l'acquisition du langage, examine l'élaboration progressive de celui-ci chez l'enfant en analysant comment les activités et capacités langagières se transforment avec l'âge et comment elles s'intègrent à l'ensemble du développement.

Si l'être humain peut, avant tout apprentissage, identifier les objets dans l'espace et reconnaître ses congénères, en revanche il ne vient pas au monde avec un système linguistique opérationnel et doit progressivement acquérir celui de son environnement au cours de la petite enfance et de l'enfance. A partir de là, la psycholinguistique développementale a pour but de déterminer la succession et l'articulation des étapes par lesquelles passe le sujet humain pour constituer son système linguistique et identifier ainsi certains ordres d'acquisition, mais aussi de dégager les processus et les facteurs qui sous-tendent et expliquent ce développement. Les données recueillies montrent une remarquable homogénéité dans les moments et l'ordre d'apparition des principales étapes de l'acquisition du langage. Tous les enfants du monde, dans des conditions normales, acquièrent l'essentiel du système linguistique de leur langue maternelle en un temps relativement court : la constitution du système linguistique commence vers la fin de la première année, avec la production des premiers mots identifiables, et peut être estimée opérationnelle vers 4-5 ans, bien que le système ne soit pas figé à partir de cet âge là.

C.2.b. Apprentissage de la lecture

Entre l'âge de 6 ans, où l'enfant ne sait pas lire toutes les lettres, et 8 ans où il est capable de reconnaître des centaines de mots en d'en déchiffrer des milliers, l'enfant a appris à

utiliser un système cognitif complexe dont le fondement est la mise en relation d'informations visuelles avec leur correspondance sonore et sémantique. On admet ainsi que, quelle que soit la méthode éducative utilisée, l'apprentissage de la langue écrite utilise une propriété innée et particulièrement performante du cerveau lui permettant dans un premier temps d'apprendre les règles de conversion de graphèmes en phonèmes et de les appliquer (stade alphabétique), puis, au fur et à mesure que la conversion graphème-phonème devient plus experte, d'apprendre à reconnaître les groupes de graphèmes formant les syllabes puis les mots, sans avoir à passer par une analyse grapho-phonologique pas à pas (stade orthographique).

Le modèle d'apprentissage de la lecture le plus connu est celui proposé par la psychologue anglaise Uta Frith (Frith, 1985; Gough and Hillinger, 1980). Ce modèle considère trois étapes successives, logographique, alphabétique et orthographique, correspondant à trois stratégies différentes d'identification des mots écrits, dont la maturation successive serait à l'origine de la formation d'un système de lecture experte. La caractéristique principale de ce modèle est de postuler que chaque étape se met en place grâce aux acquis obtenus au cours des étapes précédentes. C'est cette notion de successivité sans chevauchement qui a été récemment contestée et a donné lieu à des propositions de modèles alternatifs (voir (Rayner et al., 2001)). Selon le modèle de Frith, entre 4 et 6 ans, l'enfant serait capable de reconnaître certains mots grâce à leurs traits saillants et leur contexte. Il s'agit du stade logographique. L'étape suivante est dite alphabétique : l'enfant prend conscience de l'existence d'unités sublexicales, et apprend que les relations entre la forme écrite et la forme parlée de ces unités n'est pas arbitraire, mais répond à des règles de correspondance systématiques. Lorsque les règles de conversion graphème-phonème sont bien acquises – ou probablement avant qu'elles le soient totalement – l'étape orthographique prend place. Lorsqu'un mot a été rencontré suffisamment souvent pour devenir familier, il est adressé à un lexique interne qui le reconnaît selon sa forme visuelle globale sans avoir besoin de passer par la voie d'assemblage. Cette procédure permet un accès plus aisé et plus rapide au sens du mot. La lecture experte résulterait de l'usage de plus en plus prépondérant de cette procédure, et de son automatiser, de sorte que chez l'adulte normo-lecteur cette voie est utilisée presque exclusivement.

C.3. Traitement du langage chez l'adulte

Entre l'onde sonore qui atteint notre oreille ou le flux d'information visuelle qui atteint notre rétine, et la représentation mentale que nous construisons du message entendu ou lu, un ensemble complexe d'opérations s'effectue, dont nous n'avons pas conscience et qui sont pour une large part inaccessibles à l'observation directe. La psycholinguistique a pour but de formuler des modèles fonctionnels de ces opérations de compréhension et de production du langage indépendamment des contraintes physiologiques du cerveau. Ces différents modèles, de type modulaire ou connexionniste (cf. Annexe 1.1) représentent une base théorique importante pour les études de neuropsychologie et de neuroimagerie. Certains de ces modèles seront développés par la suite, et nous nous attarderons principalement sur les modèles théoriques de la lecture.

C.3.a. De la perception de la parole à l'accès lexical

La perception de la parole pose aujourd'hui encore beaucoup de problèmes non résolus. On peut toutefois concevoir qu'elle met en jeu trois niveaux de traitement : (a) une première analyse du signal sonore est effectuée au niveau purement auditif, i.e., indépendamment des connaissances linguistiques. Cette analyse se fonde sur de multiples indices sensoriels, variant de façon importante selon le contexte. La principale question sur ce niveau de traitement est de savoir s'il existe des détecteurs spécifiques, pré-adaptés à la perception du langage (voir (Liberman et al., 1967) pour la thèse des 'détecteurs phonétiques spécialisés' et (Kuhl, 1986) pour une revue). (b) Un second niveau de traitement va ensuite interpréter le pattern de traits phonétiques issu du niveau précédent, sous forme d'une représentation phonologique, prélexicale. Deux hypothèses principales sont proposées actuellement sur la nature de cette représentation, basée sur l'unité du phonème pour certains, sur celle de la syllabe pour d'autres (voir (Cutler et al., 1986; Savin and Bever, 1970; Segui, 1984)). (c) Enfin, le troisième niveau est celui de l'identification du mot, c'est-à-dire de l'accès lexical. Nous étudierons plus en détail ce stade de l'accès lexical dans un paragraphe commun aux deux modalités auditive et visuelle (paragraphe C.3c).

C.3.b. De la perception de l'écriture à l'accès lexical

Généralités

L'activité cognitive de la lecture correspond à la capacité humaine de traiter et comprendre des informations linguistiques écrites. La lecture est une capacité humaine artificielle et très récente, n'ayant donc pas encore été sujette aux pressions évolutives. On estime aujourd'hui que la structure et les fonctions complexes de notre système visuel datent de nos origines communes avec les primates, il y a plusieurs millions d'années. Mais si l'origine du langage oral est estimée à 100 000 années, les systèmes d'écriture – et de ce fait la lecture – n'ont émergé qu'environ 3 500 ans avant J-C (voir paragraphe B.8). L'alphabétisation n'a pas été majoritairement étendue dans les pays développés avant la deuxième moitié du XIX^e siècle. Aujourd'hui encore, une forte proportion de la population mondiale est illettrée, ou faiblement lettrée. Ainsi, les phénomènes sous-tendant les premiers niveaux de traitement des langages oral et écrit sont très différents du fait même des origines bien distinctes de ces deux processus cognitifs chez l'Homme.

Psychophysique : mise en évidence de l'"Optimal Viewing Position"

D'un point de vue psychophysique, la lecture est une forme particulière d'expertise visuelle, permettant de décoder des symboles écrits avec une efficacité remarquable. Grâce à cette capacité particulière, un lecteur expert peut identifier un mot de plus de 20 caractères en une seule fixation du regard d'une durée inférieure à 100 ms (voir (Nazir and Montant, 1996)). Les mouvements des yeux, durant la lecture, sont caractérisés par une succession de *saccades* et de *fixations*. Les saccades permettent de progresser dans

le texte et les fixations sont nécessaires pour extraire l'information. En psychologie expérimentale, l'utilisation de la technique de la position de fixation variable du regard dans le mot a permis de mettre en évidence un phénomène qui pourrait servir à explorer la nature des processus prélexicaux impliqués dans la reconnaissance visuelle des mots : l'efficacité de reconnaissance d'un mot dépend de la lettre fixée dans le mot (O'Regan et al., 1984). La reconnaissance optimale d'un mot est obtenue avec fixation du regard sur la lettre à gauche du centre du mot, pour des langues lues de gauche à droite (Farid and Grainger, 1996; Holmes and O'Regan, 1987; Nazir, 1993; Nazir et al., 1998; O'Regan and Jacobs, 1992; O'Regan et al., 1984; Vitu, 1991; Vitu et al., 1990). Ce phénomène est appelé 'Optimal Viewing Position' ou 'OVP'.

En raison de la décroissance continue de l'acuité visuelle au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la fovéa (Anstis, 1974; Levi et al., 1985; Nazir et al., 1992), la probabilité de reconnaître une lettre est fonction de l'excentricité de sa position sur la rétine. Si la chute de l'acuité visuelle était le seul facteur influençant significativement la reconnaissance d'un mot, l'OVP devrait être au niveau du centre du mot avec une décroissance égale et progressive de part et d'autre du centre du mot (McConkie et al., 1988; Nazir et al., 1991). Du fait de l'aspect asymétrique de la courbe d'OVP, on peut supposer que d'autres facteurs interviennent. Un certain nombre de facteurs ont été proposés pour expliquer l'asymétrie de la fonction, une fois combinés avec l'effet de base de l'acuité visuelle :

La direction de lecture : selon Rayner et al. (Rayner et al., 1980), l'empan perceptif pendant la lecture s'étendrait plus vers la droite (environ 15 lettres) que vers la gauche (environ 4 lettres) pour les langues lues de gauche à droite, l'inverse étant vrai pour les langues lues de droite à gauche. Les courbes typiques d'OVP (i.e. décalées sur la gauche) ont été observées pour différentes langues lues de gauche à droite (Faust et al., 1993) ; pour des mots arabes, par contre, la courbe observée est plutôt symétrique (Farid and Grainger, 1996). Ainsi, la direction de lecture d'une langue donnée pourrait être un facteur influençant la courbe d'OVP.

La distribution de l'information lexicale à l'intérieur du mot : en français, la plupart des mots sont plus facilement reconnus à partir de leurs premières lettres que de leurs dernières. Il s'agit de l'"effet de supériorité du début du mot" (Holmes and O'Regan, 1987). Cet intérêt à fixer plutôt le début d'un mot pourrait influencer la courbe d'OVP.

La spécialisation hémisphérique (voir (Brybaert, 2004)) : les personnes ayant une dominance hémisphérique gauche pour le langage tirent plus profit des fixations en début de mots que ceux ayant une dominance droite, l'inverse étant vrai pour des fixations en fin de mots (Brybaert, 1994). Ces résultats suggèrent que l'asymétrie cérébrale serait un facteur important pour la compréhension de l'effet de l'OVP. Brybaert et al. (Brybaert et al., 1996) ont suggéré que l'identification des lettres présentées dans le champ visuel droit était favorisée, du fait de la projection directe de ces informations à l'hémisphère gauche, prédominant pour le traitement du langage chez 95% des droitiers.

L'asymétrie de visibilité des lettres : L'hypothèse est qu'il y aurait une asymétrie dans la visibilité des lettres (due à leurs formes majoritairement non symétriques), à gauche ou à droite de la fixation (Bouma, 1973; Kajii and Osaka, 2000; Nazir, 1991; Nazir et al., 1992; Nazir et al., 1998). L'asymétrie dans la reconnaissance des mots en fonction de la fixation pourrait venir de l'asymétrie de visibilité des lettres composantes du mot (Nazir et

al., 1992; Nazir et al., 1998).

Fréquence positionnelle des lettres : D'autres données (Peressotti and Grainger, 1999; Stevens and Grainger, 2003) sont en faveur d'un codage positionnel des lettres : les positions des première et dernière lettres d'une séquence seraient codées précisément, et une position relative à l'intérieur de la séquence serait affectée aux autres lettres. L'étude de Stevens et Grainger montre qu'une combinaison de la visibilité des lettres et d'une mesure spécifique de la fréquence positionnelle des lettres permet de rendre compte très précisément de la forme typique asymétrique de la fonction OVP obtenue avec des mots.

Apprentissage perceptif : Puisque la distribution des sites de position du regard dans la lecture experte ressemble à la fonction d'OVP, l'asymétrie de cette fonction pourrait s'expliquer comme résultant de la fréquence avec laquelle les mots ont été vus aux différentes positions de fixation (Nazir, 2000) : le fait qu'un mot soit mieux reconnu s'il est fixé à gauche de son centre pourrait provenir du fait qu'il a été le plus souvent vu, au cours de l'apprentissage, dans cette position donnée.

Modèles de la perception de mots en modalité visuelle

De même qu'en modalité auditive, il est admis que la reconnaissance de mots écrits se fait en trois phases principales de traitement. Nous décrivons les deux premières phases d'identification de traits visuels et de lettres, avant de décrire la phase d'identification de mots – ou accès lexical –, de manière commune avec la modalité auditive, dans le paragraphe suivant.

Les principaux modèles théoriques rendant compte de la reconnaissance visuelle de mots isolés s'accordent à dire que cette reconnaissance s'effectue en trois étapes principales (Caramazza and Hillis, 1990; McClelland and Rumelhart, 1981; Paap et al., 1982). D'après ces auteurs, il existe trois niveaux représentationnels dans l'analyse visuelle des mots écrits : (1) un traitement des caractéristiques du trait visuel, permettant une computation des lignes, bordures, points, orientations etc... (2) un traitement des lettres où leur forme est reconstruite à partir des caractéristiques précédemment encodées et enfin (3) un traitement des mots, où une forme abstraite de l'item est créée à partir de l'identité graphémique de chaque lettre (représentation abstraite d'une lettre indépendante de casse, police, taille...). D'après ces modèles théoriques, la deuxième étape de traitement permettrait de différencier des items alphabétiques d'autres items ou caractères non-alphabétiques, au cours d'une phase de traitement pré-lexical. Puis la phase de traitement dite lexicale permettrait d'analyser la régularité orthographique d'une séquence, et ainsi de différencier les mots des non-mots ¹².

Les deux principaux modèles de perception visuelle des mots sont de type 'activation – vérification' (Paap and Johansen, 1994; Paap et al., 1982) et 'activation interactive' (McClelland and Rumelhart, 1981).

a. Le modèle à activation – vérification (AV)

¹² Les non-mots sont des séquences de lettres sans signification dans une langue donnée (ex : 'QTABM').

Le modèle AV (Paap et al., 1982) comprend des unités 'lettres' stockées dans un *alphabet mental* et des unités 'mots' stockées dans le *lexique mental*. Chaque lettre de l'alphabet est représentée par une liste de traits visuels. Le niveau d'activation d'une lettre est déterminé par sa probabilité de confusion avec les autres lettres, calculée à partir de données empiriques recueillies pour chaque lettre et à chaque position. L'identification d'un mot se fait en deux étapes. Dans la première étape – étape d'*activation* –, l'information visuelle issue du mot conduit à la sélection d'un petit ensemble de candidats lexicaux. La classe des candidats est constituée de la représentation du stimulus (par exemple le mot anglais " PORE ") et de celle de ses voisins orthographiques (" PORK ", " GORE ", " BORE ", " POKE ", etc...). Dans une seconde étape – étape de *vérification* –, les représentations lexicales des candidats activés sont comparées successivement à la représentation du stimulus, par ordre décroissant de fréquence d'usage des mots. Une décision est prise pour chaque candidat vérifié, jusqu'à ce que le critère de décision soit atteint pour un mot.

b. Le modèle à activation interactive ('Interactive Activation Model' ou IAM)

Selon le modèle IAM développé par McClelland et Rumelhart (McClelland and Rumelhart, 1981), le processus de reconnaissance d'un mot écrit implique trois niveaux de traitement, opérant entièrement en parallèle : le traitement des "traits visuels distinctifs" (e.g., lignes horizontales, verticales et diagonales), le traitement des "lettres" et celui des "mots". Les lettres sont codées en fonction de leurs positions à l'intérieur du mot et traitées simultanément. Les différentes unités sont interconnectées à l'intérieur d'un même niveau et à travers les niveaux adjacents. Les connexions sont excitatrices entre deux unités compatibles et inhibitrices entre deux unités incompatibles. Au niveau des mots, il existerait un mécanisme d'inhibition lexicale mutuelle de tous les candidats lexicaux actifs afin de permettre la reconnaissance du mot cible. Selon ce modèle, la perception d'un mot est influencée non seulement par les informations de bas niveau (niveau des lettres) mais aussi par les informations de plus haut niveau (niveau des mots). Lorsqu'un stimulus est présenté, les caractéristiques des lettres détectées activent simultanément les unités des lettres qui les contiennent et inhibent les autres unités de lettres. De même, les lettres activées activent les unités des mots qui les contiennent et inhibent les autres unités lexicales. En retour, les mots activés activent les lettres dont ils sont composés et inhibent les autres lettres.

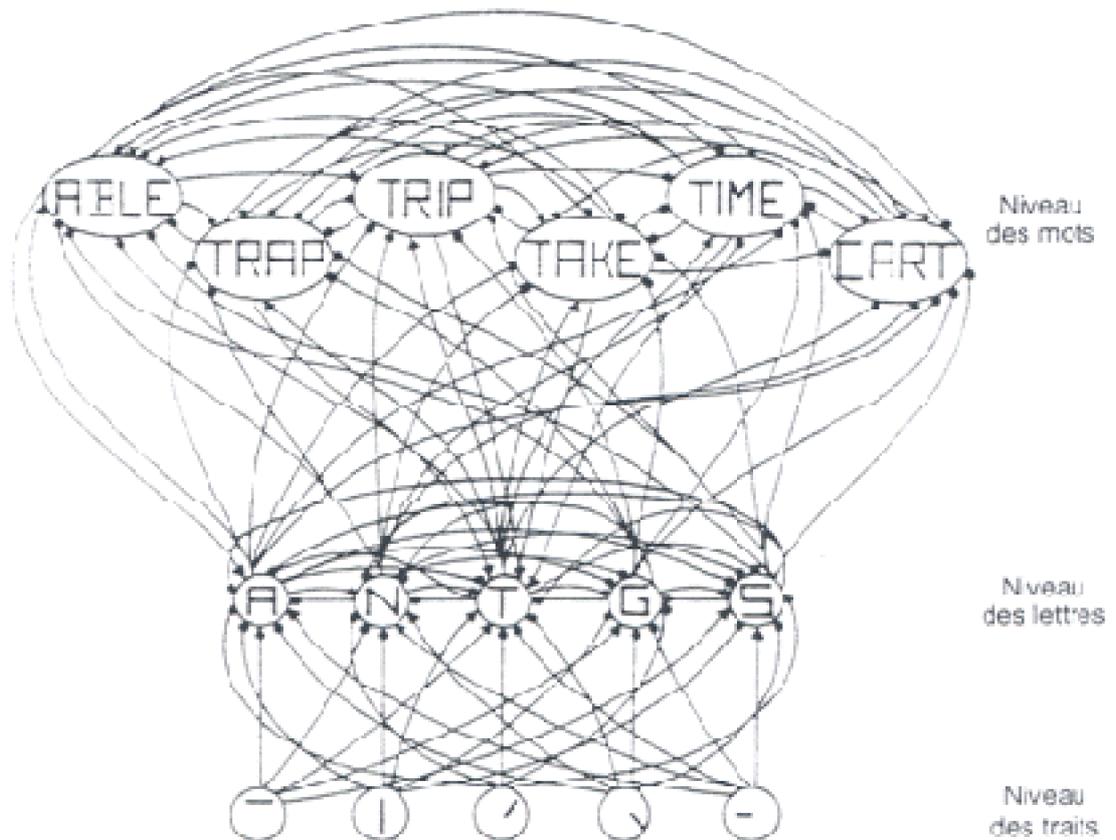


Figure 1.1 : Représentation schématique du modèle IAM (d'après (McClelland and Rumelhart, 1981)).

C.3.c. Identification des mots : accès au lexique mental

Au niveau supérieur du traitement de la parole et de l'écriture s'effectue l'identification des mots. Reconnaître un mot suppose qu'il ait été précédemment enregistré en mémoire. En d'autres termes, tout locuteur d'une langue possède en mémoire un lexique interne, c'est à dire un ensemble de représentations correspondant aux unités signifiantes de sa langue. On peut, en première approximation, envisager ce lexique sur le modèle d'un dictionnaire, c'est-à-dire comme une liste ordonnée 'd'entrées lexicales', dont chacune comporterait l'ensemble des informations nécessaires pour identifier, comprendre et utiliser l'unité considérée. Chaque entrée lexicale est caractérisée par trois types d'informations : (a) la forme phonologique (acoustique, articulatoire et graphique) du mot ; (b) les propriétés syntaxiques et morphologiques (catégorie, genre, nombre, etc.) définissant ses possibilités d'utilisation dans une phrase ; (c) sa signification et éventuellement ses conditions d'utilisation selon la situation ¹³.

¹³ Ces deux derniers ensembles de propriétés – syntaxiques et sémantiques – constituent ce que Levelt Levelt WJM. Speaking: From Intention to Articulation. Cambridge: MIT Press, 1989. propose d'appeler le 'lemma', distinct de la forme phonologique, auquel le locuteur, en production, aurait accès indépendamment de celle-ci.

Notons que les nombreux travaux consacrés à l'étude du lexique mental l'ont abordé de deux façons différentes. Les uns se sont intéressés à l'accès lexical, c'est-à-dire aux mécanismes par lesquels les mots sont retrouvés en mémoire, pour être reconnus ou produits ; les autres ont porté sur la représentation mentale des significations (sémantique psychologique) et leur organisation en mémoire (mémoire sémantique). Bien que les deux types de problèmes soient liés, les travaux qui les concernent se sont développés de façon relativement indépendante. Nous parlerons dans ce chapitre d'accès aux mémoires des mots, et nous ne traiterons pas de l'accès aux significations des mots, ce traitement ne prenant pas place dans notre problématique.

L'étude de l'accès lexical doit répondre à deux types de questions : (a) Il s'agit de définir la nature du lexique interne : quelles sont les unités qui y figurent ? Comment sont-elles classées et quelles relations entretiennent-elles ? (b) Il faut par ailleurs tenter de définir les processus d'accès au lexique : sont-ils passifs (activation automatique d'une représentation en mémoire), ou actifs (recherche, systématique ou non, à travers le lexique) ? En outre, s'agit-il d'un mécanisme indépendant, qui se déroule de façon autonome, ou est-il en interdépendance avec des processus qui s'effectuent simultanément, à d'autres niveaux ?

Phénomènes généraux sur le lexique mental

Dès les premiers travaux sur l'accès lexical, deux phénomènes très généraux ont été mis en évidence : plus un mot est fréquent plus son accès est rapide – c'est l'effet de fréquence –, et cet accès est plus rapide si le mot est précédé par un autre mot lui étant sémantiquement associé – c'est l'effet d'amorçage. L'**effet de fréquence** est observé dans la tâche typique de décision lexicale : lorsqu'il perçoit une succession de stimuli étant des mots ou des non-mots¹⁴, un sujet sera plus rapide, par exemple, pour identifier 'table' comme étant un mot plutôt que 'tarse', sa fréquence lexicale¹⁵ étant de 4.4 contre 0.6 pour 'tarse'. Dès 1951, Howes et Solomon avaient observé que le seuil d'identification d'un mot était d'autant plus bas que sa fréquence était plus grande (Howes and Solomon, 1951), et le même effet a été retrouvé par la suite dans des tâches très variées. D'autre part, l'**effet d'amorçage** est mis en évidence dans les tâches d'amorçage sémantique

¹⁴ Les non-mots sont des successions de lettres imprononçables et n'ayant aucune signification dans la langue considérée (exemple : HUJSQ).

¹⁵ La fréquence lexicale vise à fournir une information sur la fréquence d'usage associée à une entrée lexicale. Le seul inventaire dont on dispose pour la langue française orale est celui de Gougenheim et al. Gougenheim G, Rivenc R, Michea R, Sauvageot A. L'élaboration du français fondamental. Paris: Didier, 1964., qui porte sur un corpus de conversations spontanées de 312 135 mots, et fournit la fréquence des 1063 mots les plus usités. Dans notre étude, basée sur des stimuli visuels et non oraux, les fréquences lexicales (rapportées en valeurs logarithmiques) proviennent de la base de données lexicales informatisée Brulex Content AM, P. Radeau, M. BRULEX : une base de données lexicales informatisée pour le français écrit et parlé. L'Année Psychologique 1990; 90: 551.. Les fréquences sont reprises des tables publiées par le Centre de Recherche pour un Trésor de la Langue Française Imbs P. Etudes statistiques sur le vocabulaire français. Dictionnaire des fréquences. Paris: Didier, 1971.. Elles représentent le nombre d'occurrences d'une chaîne de caractères rapporté à un total de 100 millions, pour un échantillonnage de textes de la seconde moitié du XX^e siècle.

semantic priming) : Meyer & Schvaneveldt (Meyer and Schvaneveldt, 1971) observent, par exemple, que dans une tâche de décision lexicale le mot 'doctor' ('docteur') est identifié plus vite s'il a été précédé du mot 'nurse' ('infirmière') que du mot 'bread' ('pain') ; en revanche, 'bread' facilite l'identification de 'butter' ('beurre').

Deux autres phénomènes mis en évidence plus récemment sont venus s'ajouter aux précédents. Tout d'abord, l'**effet de voisinage orthographique**¹⁶ interfère avec l'effet de fréquence. Dans une épreuve de décision lexicale, Grainger et al. (Grainger et al., 1989) ont montré que le temps de reconnaissance d'un mot écrit est plus long quand il possède un voisin orthographique dont la fréquence est plus grande. Par exemple, bien que les deux mots 'nerf' et 'abus' aient des fréquences équivalentes, le premier est identifié moins vite que le second, car il a un voisin plus fréquent ('neuf'), ce qui n'est pas le cas du second. Cet effet s'observe également sur les non-mots qui, dans une tâche de décision lexicale, sont moins rapidement rejetés s'ils sont voisins orthographiques d'un mot réel (Forster, 1989). Il existe enfin un phénomène appelé **effet d'amorçage par la forme** (*form priming*) : l'identification d'un mot écrit est facilitée s'il est précédé par un stimulus d'orthographe voisine (Forster et al., 1987).

Ces différents résultats de psychologie expérimentale ont servi de base aux réflexions sur la nature du lexique interne ainsi qu'à l'élaboration de modèles d'accès au lexique.

Nature du lexique interne

Un grand nombre de questions restent à ce jour non élucidées quant à la 'contenance' du lexique mental. Entre autres, notre lexique interne contient-il tous les mots de la langue, ou seulement les morphèmes (cf. paragraphe B.3 ; chapitre linguistique) qui les constituent, et qui peuvent être combinés de différentes façons, conformément à des règles apprises avec le lexique ? Certaines données vont dans le sens d'une décomposition en morphèmes préalable à l'accès lexical (voir (Stanners et al., 1979; Taft and Forster, 1975)). Cependant, il semble que les mots préfixés ou suffixés ne donnent lieu à un amorçage sur leur radical que si leur sens peut être immédiatement construit à partir de leur composition ; dans le cas contraire, ils figureraient dans le lexique sous leur forme complète (Marslen-Wilson et al., 1994). Ainsi, si l'on peut admettre que la représentation mentale du mot 'remettre' donne lieu à décomposition, cela devient plus contestable pour 'renoncer', qui est pourtant bien, étymologiquement, un mot composé. La fréquence d'emploi joue également un rôle : les mots suffixés de fréquence élevée (par exemple, 'travailleur') figureraient sous forme complète, alors que les mots plus rares (comme 'travailleuse') ne seraient identifiés qu'à partir des morphèmes qui les composent (Meunier and Segui, 1999).

Un second problème est celui des mots polysémiques. Un mot comme 'grève' par exemple comporte-t-il deux entrées lexicales ('grève' = plage et 'grève' = arrêt de travail), dont l'accès serait commandé par le contexte ? Ou bien n'avons-nous en mémoire qu'un seul mot, dont la signification serait sélectionnée après l'accès lexical ? Les résultats

¹⁶ Les voisins orthographiques d'un mot sont tous les mots qui ne diffèrent de celui-ci que par une seule lettre (par exemple, 'loin', 'coin', 'sain' et 'soif' sont des voisins orthographiques de 'soin').

d'une expérience de Swinney (Swinney, 1979) vont dans le sens de la seconde hypothèse, mais il faut toutefois signaler qu'ils n'ont pas toujours été reproduits. Enfin, les locutions telles que 'briser la glace', 'tenir la jambe', semblent être enregistrées directement dans le lexique, au même titre que les mots (Swinney and Cutler, 1979).

Un ou plusieurs lexiques ?

On parle généralement du lexique mental, mais différentes observations laissent supposer l'existence de plusieurs lexiques mentaux : (a) il n'est pas évident que les *mots fonctionnels* (articles, pronoms, prépositions, conjonctions, etc.) soient enregistrés de la même façon et dans le même lexique que les *mots sémantiques* (noms, verbes, adjectifs). Ils peuvent, par exemple, donner lieu à un déficit sélectif dans certains cas d'aphasie (Morton, 1982). (b) Faut-il envisager un lexique commun au langage oral et au langage écrit ? Les nombreux travaux à ce sujet (voir pour revue (Balota, 1994; McCusker et al., 1981)) invitent à envisager l'idée d'un double accès, visuel et phonologique, les deux processus opérant en parallèle. (c) On peut se demander aussi si production et compréhension de mots font appel à deux systèmes lexicaux distincts, comme peuvent le suggérer les observations neuropsychologiques de patients aphasiques montrant des atteintes distinctes du système de compréhension ou du système de production. Les tableaux cliniques d'aphasie étant très complexes et les données expérimentales à ce sujet assez faibles, il est difficile de répondre de manière précise à cette interrogation. (d) Enfin, comment faut-il concevoir le lexique des sujets bilingues ? Cette question reste totalement ouverte aujourd'hui encore, l'hypothèse la plus probable étant qu'il existe deux systèmes distincts, mais non totalement séparés (cf. (de Groot, 1998; Francis, 1999) pour revues).

Accès au lexique mental : Modèles de perception et compréhension du langage

Il reste maintenant à s'interroger sur les processus par lesquels s'effectue l'accès lexical, c'est-à-dire comment, à partir d'un stimulus auditif ou visuel, nous retrouvons la trace mnésique d'un mot, avec toutes les informations qui lui sont associées. Cette question de l'accès au lexique mental a donné lieu à de nombreuses études dont ont découlé un certain nombre de modèles, basés sur deux principes différents, à savoir une recherche active ou une activation passive.

a. Modèles classiques d'accès au lexique mental

D'après le modèle de Forster (Forster, 1976), conforme à une conception modulaire (cf. Annexe 1.1), le traitement lexical s'effectue indépendamment des niveaux syntaxique et sémantique, le lexique étant considéré comme un dictionnaire que l'on consulterait selon une recherche séquentielle et active. Pour Forster, le 'processeur linguistique' est constitué d'une série de processeurs autonomes, dont chacun reçoit le produit du précédent, le traite, et transmet au processeur suivant le résultat de son traitement (Forster, 1979). Le lexique correspond à un fichier central (le 'master file', contenant l'ensemble des informations syntaxiques, sémantiques et morphologiques sur chaque

mot) et trois fichiers périphériques. Le premier comporte des 'entrées' correspondant à la forme graphique des mots (il est utilisé dans le traitement du langage écrit), le second contient la forme phonologique (il sert à la perception de la parole), le troisième est organisé sur une base syntactico-sémantique (il est utilisé pour la production de la parole). Pour Forster, les mots sont classés selon leur fréquence. Sur la base des informations sensorielles, l'auditeur ou le lecteur va parcourir son lexique jusqu'à percevoir le mot, qui sera alors renvoyé au fichier central où se trouvent les informations concernant ce mot. Ce modèle explique d'une part les effets de fréquence lexicale, les mots les plus fréquents étant trouvés dès le début de la recherche, et d'autre part les temps de réponse plus longs pour les non-mots que pour les mots, puisqu'il faut parcourir toute la liste avant de pouvoir décider que l'item n'est pas contenu dans le lexique. Mais certains phénomènes, comme celui de l'amorçage sémantique, s'intègrent mal à ce modèle, ce qui invite à privilégier plutôt les modèles d'activation – sans doute plus plausibles du point de vue neurophysiologique que des modèles inspirés, comme celui de Forster, du fonctionnement des ordinateurs.

L'hypothèse alternative avancée par Morton (Morton, 1979; Morton, 1980; Morton, 1982) suggère qu'il n'y a pas recherche, mais activation automatique des mots par les informations recueillies par le système. Il propose un modèle direct de traitement du lexique mental appelé modèle des logogènes¹⁷. Ce processus d'activation passive qui permet de rendre compte, par exemple, de l'effet d'amorçage, suppose une interaction permanente entre toutes les sources d'information et tous les niveaux du traitement. Morton préconise par ailleurs l'influence du contexte au niveau de la reconnaissance lexicale. Selon lui, toute représentation du mot est accompagnée d'indices permettant d'accéder rapidement à l'élément en question et de faire des anticipations sur ce qui va suivre. Il n'y a pas, dans ce modèle, de lien entre les processus d'accès à la phonologie et à l'orthographe.

Des conceptions analogues – fortement interactives – se retrouvent dans le modèle de la 'COHORTE' proposé par Marslen-Wilson, ou dans le modèle connexionniste 'TRACE' de McClelland et Elman.

L'importance des effets contextuels et le caractère interactif des processus entrant en jeu dans l'accès lexical en modalité auditive ont été mis en lumière par les travaux de Marslen-Wilson et al. (Gaskell and Marslen-Wilson, 1997; Gaskell and Marslen-Wilson, 2002; Marslen-Wilson, 1984; Marslen-Wilson and Tyler, 1980; Marslen-Wilson and Welsh, 1978; Marslen-Wilson, 1987), dont découle le modèle dit de la 'COHORTE'. Ces travaux mettent en avant deux nouveaux points primordiaux : (a) les mots sont généralement reconnus avant d'avoir été complètement entendus, selon la composition du lexique : le mot est identifié dès que le sujet a recueilli assez d'informations pour pouvoir le distinguer des autres mots possibles. (b) De plus, l'identification de mots dépend fortement du contexte syntaxique et sémantique.

Le modèle TRACE, proposé par McClelland & Elman (McClelland and Elman, 1986), s'inspire directement de celui de Marslen-Wilson, mais dans une perspective

¹⁷ Selon Morton, un logogène est un dispositif dont l'effet est de produire la représentation consciente du mot ; à chaque mot du lexique correspond un logogène.

connexionniste. La perception des signaux acoustiques active en cascade plusieurs niveaux de traitement (phonétique, phonologique, lexical) qui interagissent entre eux à chaque instant du traitement. De la même façon que dans le modèle COHORTE, la reconnaissance du mot a lieu lorsqu'un seul candidat est identifié au sein d'un ensemble d'unités lexicales en compétition.

b. Modèles de lecture

La littérature distingue classiquement deux grands types de modèles de lecture de mots isolés, issus d'une théorie dualiste pour les uns, unitaire pour les autres. Le premier type de modèles – modèles double-voie – suppose l'existence de deux mécanismes de traitement fonctionnellement indépendants pour la lecture de mots familiers d'une part, celle de mots nouveaux ou pseudo-mots¹⁸ d'autre part. Selon le deuxième type de modèles – modèles à voie unique – l'ensemble des catégories d'items orthographiques serait lu grâce à un système unique à procédure uniforme.

Modèle de lecture double-voie classique (Coltheart ; Morton & Patterson)

L'arrivée de la neuropsychologie cognitive dans les années 70 a permis de remettre en cause le modèle de lecture de Déjerine, prédominant au XIX^e siècle (voir le paragraphe D.2 pour la description de ce modèle). En effet, les dyslexiques de surface peuvent lire les pseudo-mots et pas les mots irréguliers (comme 'monsieur' en français par exemple) alors que les dyslexiques phonologiques montrent la dissociation inverse (voir paragraphe D.5 sur la dyslexie). L'interprétation de cette 'double dissociation', historiquement décrite par Marshall & Newcombe (Marshall and Newcombe, 1973), est que l'habilité à générer le son d'un mot à partir de ses lettres composantes (lecture sub-lexicale) est fonctionnellement dissociable de l'habilité à lire des mots avec uniquement le pattern orthographique à disposition (pour les mots irréguliers). Ces résultats étant incompatibles avec le modèle neurologique du XIX^e siècle, différents chercheurs ont tenté de prendre en compte cette double dissociation pour proposer des modèles de lecture dits à double-voie, modèles qui se sont développés sous l'influence du connexionnisme.

La théorie des modèles double-voie a été inspirée du modèle "logogène" de Morton (Morton, 1980). Selon ce modèle, et du point de vue de la perception du langage écrit, chaque mot que nous connaissons possède un logogène lui correspondant, auquel les stimuli visuels accèdent directement. L'accès lexical est ainsi direct, et se produit en parallèle pour tous les mots. Les notions de lexique mental et d'activation en mode 'tout ou rien' ont été reprises dans les modèles de lecture double-voie. La principale idée de ces modèles est que la reconnaissance des mots utilise deux procédures de traitement, fonctionnant de manière indépendante et parallèle (Coltheart, 1978; Morton and Patterson, 1980) (voir figure 1.2).

¹⁸ Les pseudo-mots sont des séquences de lettres prononçables mais sans signification dans une langue donnée (ex : 'RACTE').

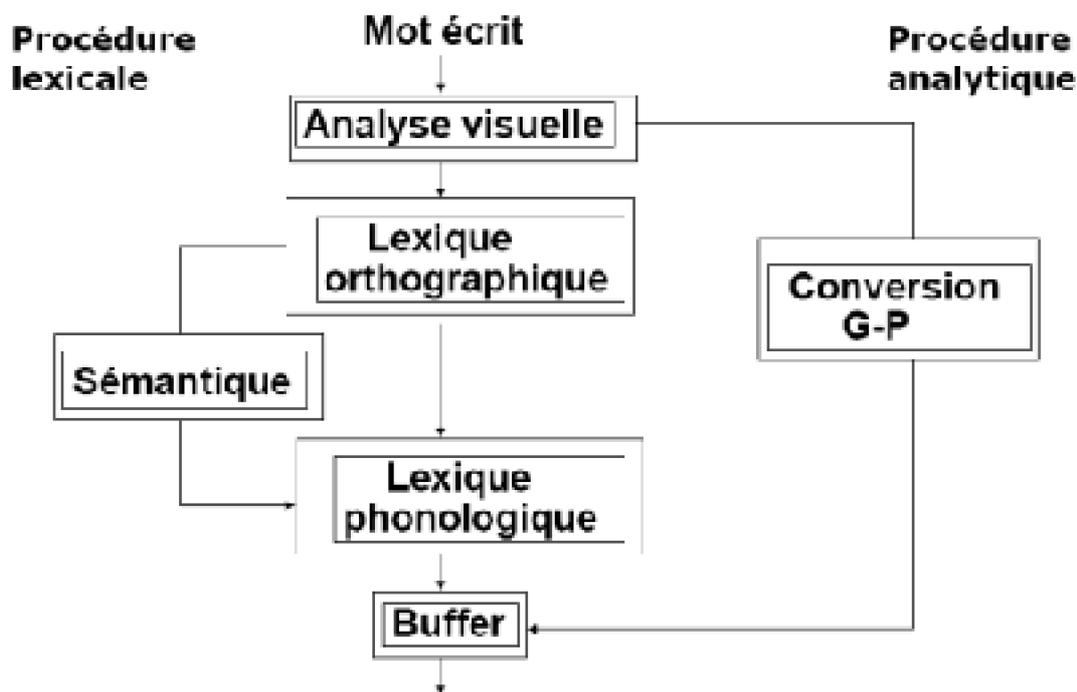


Figure 1.2 : Représentation schématique du modèle de lecture "à double voie" (selon Coltheart, 1978).

Dans un premier temps, l'analyse visuelle graphique correspond au traitement perceptif. Puis deux voies parallèles sont possibles. D'un côté, la procédure d'assemblage (ou analytique) sert à la lecture des mots non familiers sans représentation en mémoire, et des pseudo-mots. La représentation phonologique est obtenue par assemblage des différentes unités sublexicales. De l'autre, la procédure d'adressage (ou lexicale) permet un accès direct à la représentation phonologique en mémoire des mots écrits familiers (Coltheart et al., 1993; Ellis, 1984). Enfin, la mémoire tampon phonologique est une mémoire de travail spécifique à la production orale : elle code les représentations abstraites des phonèmes ainsi que l'ordre dans lequel ils sont agencés (Coltheart, 1978). Le stockage dans cette mémoire tampon permet à la fois de convertir le code phonologique en code articulatoire, et de maintenir l'information en cours de prononciation.

La procédure d'assemblage – voie non lexicale, indirecte, analytique – repose sur l'utilisation d'un ensemble de règles qui spécifient les correspondances entre l'orthographe et la phonologie des mots (Figure 1.3), permettant la lecture des mots non familiers. L'utilisation de cette voie suppose une segmentation des mots en graphèmes¹⁹, puis une mise en correspondance entre ces graphèmes et les phonèmes²⁰ correspondants, dans la mémoire tampon. Ces phonèmes sont ensuite assemblés et le mot est prononcé sur la base du code phonologique.

¹⁹ Un graphème est l'équivalent orthographique d'un phonème (voir paragraphe B.8.a ; 'L'orthographe')

²⁰ Un phonème est la plus petite unité sonore, ayant un caractère distinctif dans une langue donnée (voir paragraphe B.1)

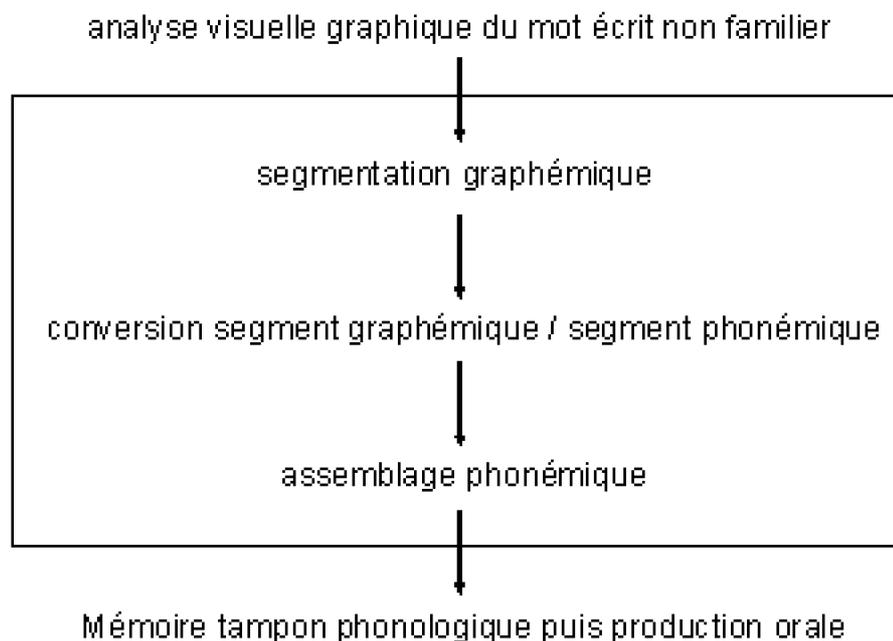


Figure 1.3 : Représentation schématique de la procédure d'assemblage en lecture.

La procédure d'adressage – voie lexicale, directe – engendre un accès direct au "lexique mental" qui contient en particulier les informations orthographiques – stockées au cours de l'apprentissage – associées aux mots familiers ("lexique orthographique d'entrée") (Figure 1.4).

L'identification rapide et directe d'un mot familier se ferait par réactivation de la trace mnésique de ce mot, appelée "représentation abstraite du mot" ou "visual word form" (Riesenhuber and Poggio, 1999; Warrington and Shallice, 1980). Puis cette représentation orthographique activerait le réseau en mémoire sémantique auquel le mot appartient. Les mots seraient ensuite prononcés sur la base des informations phonologiques contenues dans le système phonologique de sortie.

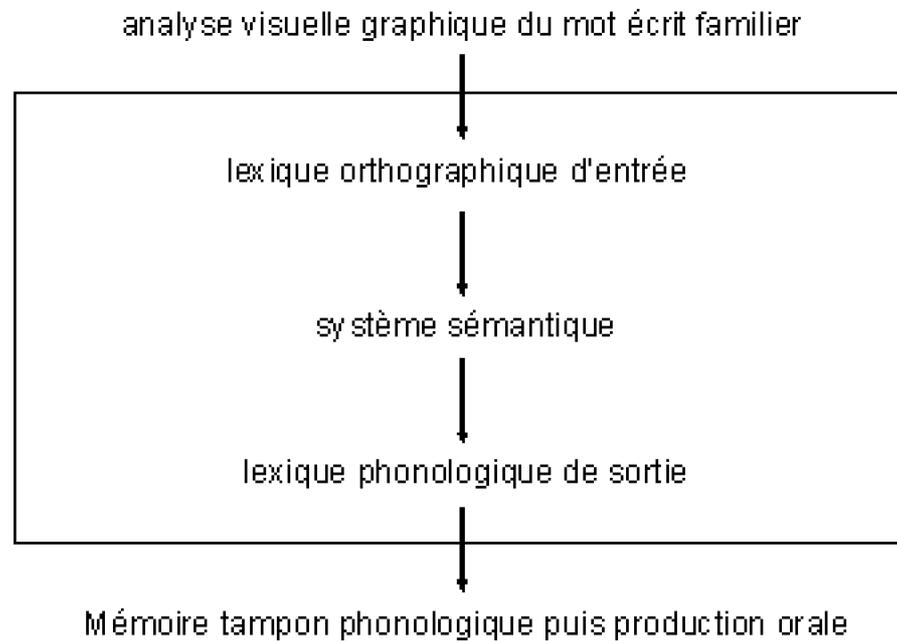


Figure 1.4 : Représentation schématique de la procédure d'adressage en lecture.

Un déficit de la voie non lexicale de lecture rend parfaitement compte du trouble spécifique de la dyslexie phonologique, à savoir une reconnaissance de mots normale et une reconnaissance de pseudo-mots altérée, voire impossible. À l'inverse, le principal syndrome de la dyslexie de surface est une lecture de mots irréguliers donnant lieu à des erreurs de régularisation. Ce déficit s'explique par une perte de la voie directe de lecture, donc un traitement de tous les mots par conversion graphème/phonème, ce qui explique les erreurs en lecture de mots ne répondant pas à ces règles particulières.

Différentes études montrant que la lecture des pseudo-mots est influencée par la connaissance lexicale ont remis en cause les principes d'indépendance des voies et de traitement de type 'tout ou rien'. Afin de pallier ces limites, Coltheart et al. (Coltheart et al., 1993; Coltheart et al., 2001) ont proposé une nouvelle version du modèle double-voie, dans laquelle le système impliquerait un traitement en cascade plutôt qu'un traitement à seuil.

MODÈLE DOUBLE-VOIE À TRAITEMENT EN CASCADE (COLTHEART ET AL., 2001)

Dans le modèle double-voie à traitement en cascade, présenté figure 1.5, le traitement des items repose sur trois principes : (a) L'activation est **graduelle**, et non plus en 'tout ou rien' comme dans la version antérieure (Coltheart, 1978). (b) Le traitement opère **en cascade**. Ainsi, dans cette nouvelle version, la reconnaissance des mots chez le lecteur adulte suppose la mise en jeu parallèle des deux voies, lexicale et non-lexicale. (c) Le traitement est **entièrement interactif**, c'est-à-dire que chaque module contribue à l'activation et à l'inhibition de tous les modules adjacents, de manière bidirectionnelle.

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

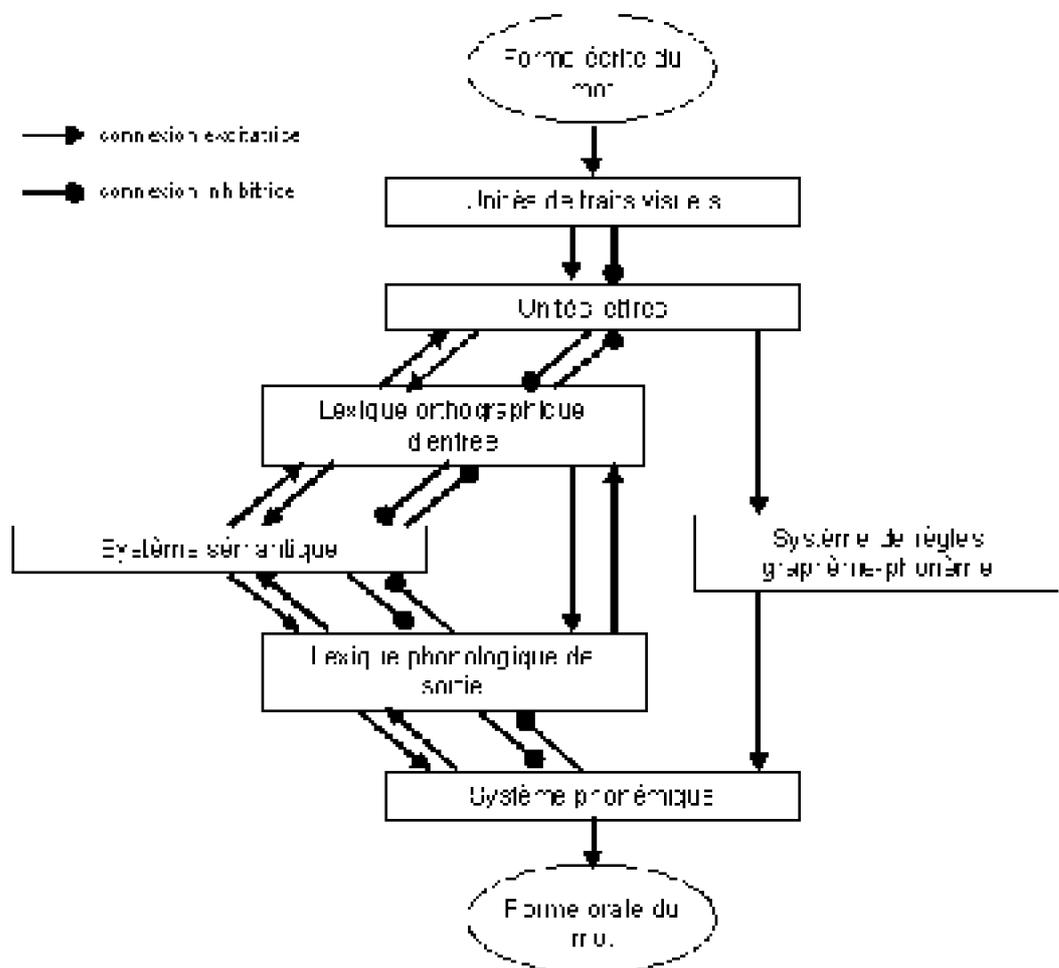


Figure 1.5 : Modèle double-voie à traitement en cascade, selon (Coltheart et al., 2001)

Le modèle est toujours basé sur l'existence de deux voies, lexicale et non-lexicale, et une voie 'lexicale par médiation sémantique' est ajoutée au modèle (Figure 1.5). La voie lexicale est composée d'un système de reconnaissance visuelle et d'un système de production phonologique. Le système de reconnaissance visuelle est une généralisation du modèle IAM de McClelland & Rumelhart (McClelland and Rumelhart, 1981) (paragraphe C.3.b). La couche d'entrée représente le traitement des traits visuels, la couche suivante permet le traitement des unités 'lettres', et enfin la troisième couche du modèle représente l'accès aux formes orthographiques des mots. Toute unité 'trait' (de la couche 'trait') d'une position donnée entretient des connexions excitatrices avec les unités 'lettres' (de la couche 'lettre') codant pour la même position et contenant ce trait, et des connexions inhibitrices avec les unités 'lettres' codant pour la même position mais ne contenant pas ce trait ou codant pour une position différente. De la même manière, chaque unité 'lettre' d'une position donnée entretient des connexions excitatrices avec les unités 'mots' contenant cette lettre dans la même position, et des connexions inhibitrices

avec les unités 'mots' ne contenant pas cette lettre ou contenant cette lettre dans une position différente. Les unités du lexique orthographique disposent d'un niveau d'activation résiduel proportionnel à la fréquence d'occurrence du mot qu'elles codent. Le système de production est quant à lui inspiré du modèle de Dell (Dell, 1986). Il comprend une représentation des mots sous forme phonologique, puis un transfert au niveau phonémique. Les connexions au sein de ce système suivent les mêmes règles que pour le système de reconnaissance : les connexions entre les unités 'mots' et 'phonèmes' sont excitatrices uniquement lorsque le mot possède le phonème dans la position appropriée, dans tous les autres cas, elles sont inhibitrices. L'ensemble des connexions existant entre le niveau des lettres et celui des mots du lexique d'entrée orthographique d'une part, et le niveau des mots du lexique de sortie phonologique et celui des phonèmes d'autre part, est bidirectionnel, conférant au modèle son caractère interactif. Toutes les connexions bidirectionnelles reliant les deux lexiques sont exclusivement excitatrices. La voie non lexicale partage avec la voie lexicale les couches d'unités de traits visuels, de lettres et de phonèmes. Elle contient par ailleurs un système de conversion graphème-phonème déjà décrit dans le précédent modèle (cf. Figures 1.2 et 1.3).

Quelle que soit la chaîne de lettres présentée, le traitement débute simultanément dans les deux voies. La voie lexicale, directe et plus rapide, intervient de façon prépondérante pour la lecture des mots fréquents. En revanche, la lecture des mots peu fréquents et des pseudo-mots est possible grâce à la voie grapho-phonémique. Les informations phonologiques issues de ces deux voies convergent vers le système phonémique de sortie. Le mot est ensuite prononcé. Ces deux voies sont indissociables puisque la voie non-lexicale est nécessaire à la reconnaissance de nouveaux mots, reconnus ensuite grâce à la voie lexicale. D'autre part, une attention visuelle efficace (indispensable à la voie directe) est nécessaire à une bonne segmentation dans la voie indirecte (Castles and Coltheart, 1993; Sprenger-Charolles et al., 2000).

Ce type de modèles – incluant aussi celui de Patterson & Shewell (Patterson and Shewell, 1987) qui rend compte en plus du langage oral – a l'avantage de prendre en compte les multiples étapes de traitement du langage écrit, en introduisant de nombreux modules dans leur schéma d'ensemble. Néanmoins, d'autres types de modèles cognitifs ont montré que les mêmes ensembles de fonctions peuvent être implémentés en réduisant le nombre de composantes et en augmentant le nombre d'interactions entre elles : ce sont les modèles "connexionnistes" ou "parallel distributed processing".

Modèle de lecture à traitement parallèle et distribué (modèle à voie unique)

Le principe de ce nouveau type de modèles, apparus à la fin des années quatre-vingt, est que le traitement en cascade est remplacé par un traitement parallèle et distribué (Harm and Seidenberg, 1999; Plaut et al., 1996; Seidenberg and McClelland, 1989). Dans les modèles connexionnistes PDP (Parallel Distributed Processing), les représentations sont distribuées et non pas locales comme dans les modèles double-voie. Ainsi, un mot est représenté par un pattern d'activation et non par l'activité d'unités individuelles. Ce pattern met en jeu un ensemble d'unités, chaque unité intervenant dans la représentation de nombreux autres mots, les mots similaires engendrant ainsi des patterns d'activation semblables. Les relations entre orthographe, phonologie et sémantique sont encodées au travers des poids de connexion, qui sont modifiés au fil de

l'expérience individuelle et non plus fixés.

Dans la lignée des modèles PDP, le modèle de Seidenberg & McClelland (Seidenberg and McClelland, 1989) est composé de trois couches interconnectées, codant pour l'orthographe, la phonologie et la sémantique (cf. figure 1.6). Les différents lexiques phonologiques et orthographiques d'entrée et de sortie identifiés dans les précédents modèles sont remplacés par des connexions entre phonologie et sémantique (P-S et S-P), sémantique et orthographe (S-O et O-S) et orthographe et phonologie (O-P et P-O), et il n'y a pas de distinction entre traitement lexical ou sublexical.

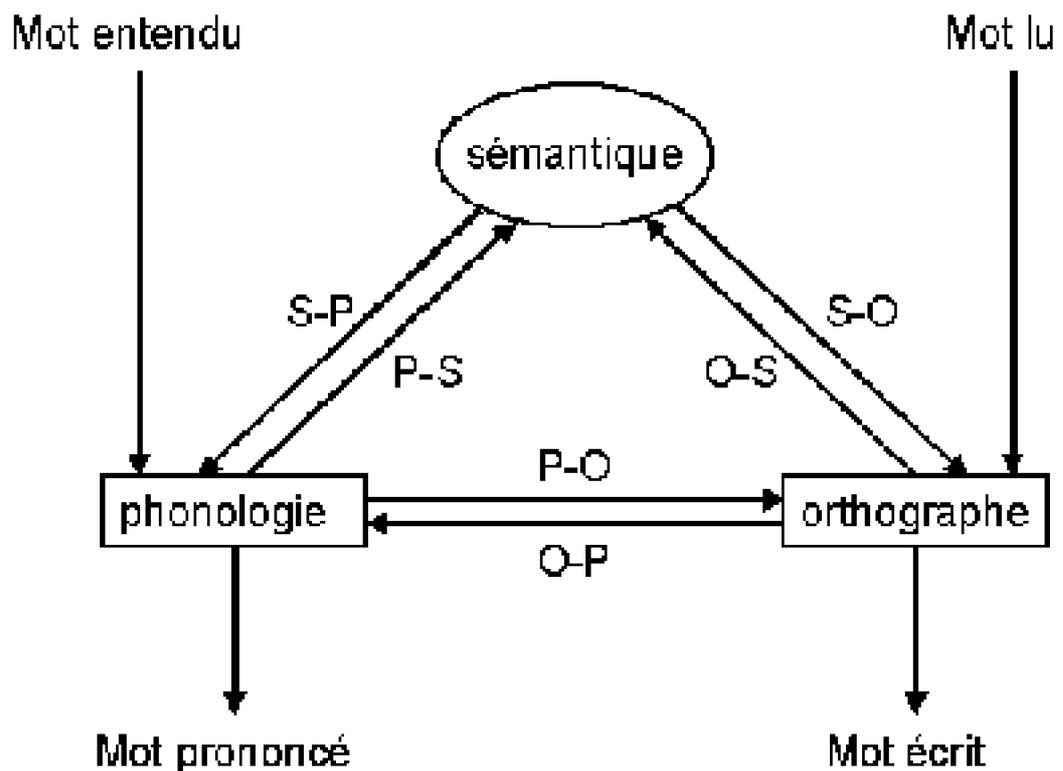


Figure 1.6 : Modèle connexionniste adapté de (Seidenberg and McClelland, 1989)).

L'apprentissage de la lecture entraîne une adaptation des poids de connexion entre les formes orthographique et phonologique, et entre les formes orthographique et sémantique. Dans ce modèle, le codage des unités orthographiques correspond à des triplets de lettres, ce qui permet de spécifier le contexte qui suit et précède chaque lettre composant l'item d'entrée. Le codage des unités phonologiques suit le même principe.

En s'appuyant sur ce modèle, la dyslexie phonologique (déficit de lecture des mots nouveaux) résulterait d'une perte de connexions entre les composantes orthographique et phonologique (Plaut and Shallice, 1993) et la dyslexie de surface (déficit de lecture des mots irréguliers), d'un déficit dans les traitements sémantiques (Plaut et al., 1996).

Malgré les performances satisfaisantes de ce réseau en lecture de mots, il a été vivement critiqué quant à ses capacités à simuler la lecture de pseudo-mots et la décision lexicale (Besner et al., 1990; Coltheart et al., 1993; Norris, 1994). La théorie sous-jacente à ce modèle semble difficile à imposer comme alternative satisfaisante au postulat des

modèles double-voie, selon lequel la lecture des mots irréguliers et des pseudo-mots engagerait des mécanismes différents. Selon Seidenberg & McClelland (Seidenberg and McClelland, 1990), ces faibles performances du modèle pourraient être principalement liées au codage de l'information sous forme de triplets. Afin de pallier ce problème, Plaut et al. (Plaut et al., 1996) ont proposé une nouvelle version implémentée de ce réseau intégrant un tout autre mode de codage.

Le modèle de Plaut et al. (Plaut et al., 1996) propose un réseau composé des trois mêmes couches que le modèle de Seidenberg & McClelland, mais il diffère par le codage des unités orthographiques et phonologiques. Ce deuxième type de modèle à système unique de lecture est aussi compétent que les modèles à double-voie pour expliquer et simuler la lecture et la décision lexicale sur des mots et des pseudo-mots. Cependant, ce modèle *PDP* autant que le précédent est limité du fait de sa restriction aux mots monosyllabiques. Le modèle que nous présentons maintenant surmonte cette faiblesse en expliquant et en simulant le traitement des items à la fois mono- et polysyllabiques.

Modèle de lecture multi-traces ((Ans et al., 1998))

Ce modèle de lecture de mots isolés (voir la figure 1.7) est au carrefour entre les deux points de vue unitaire et dualiste présentés précédemment. Il se base sur une voie unique, tous les items orthographiques étant traités par la même succession de couches neuronales, mais il intègre par ailleurs une double procédure de traitement. Contrairement aux modèles double-voie, ce modèle n'intègre pas de système de règles de conversion graphème/phonème, mais suppose que la correspondance entre orthographe et phonologie émerge seulement de l'apprentissage des mots entiers et des syllabes de ces mots. Mais malgré sa voie unique de traitement, ce modèle suppose, à l'encontre des modèles *PDP*, que deux modes de lecture – global et analytique – sont nécessaires pour générer la prononciation de l'ensemble des séquences de lettres, familières et non familières. Aucun de ces modes n'est spécifique au traitement d'un type d'item particulier, mots ou pseudo-mots. De plus, leur intervention est successive, le mode global opérant systématiquement avant une éventuelle implication du mode analytique.

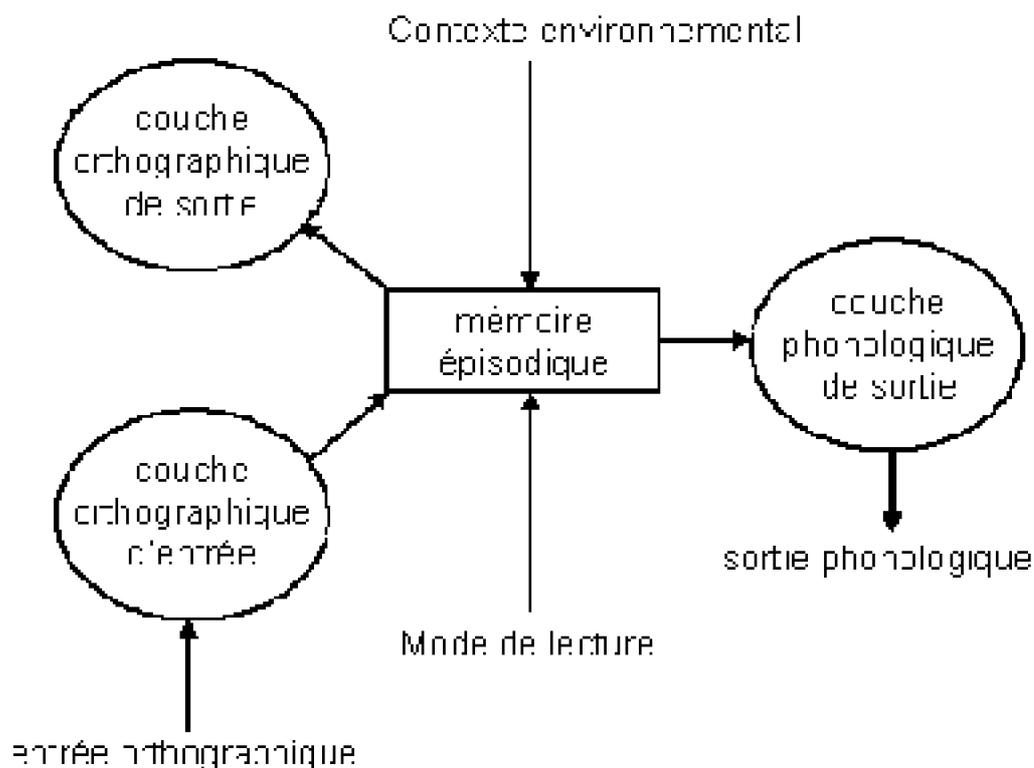


Figure 1.7 : Architecture d'ensemble du modèle de Ans et al. (Ans et al., 1998)

Ce réseau unidirectionnel est constitué de quatre couches : orthographique d'entrée, orthographique de sortie, mémoire épisodique, et phonologique de sortie (cf. Figure 1.7). Le codage de l'entrée orthographique dépend à la fois du mode de lecture utilisé et du point de focalisation de la fenêtre visuo-attentionnelle. En mode global, la fenêtre visuo-attentionnelle englobe l'ensemble des unités codant pour chacune des lettres du mot ainsi que celles codant pour les espaces initial et final. En mode analytique, la fenêtre visuo-attentionnelle comprend seulement une partie réduite de la séquence de lettres, le reste des lettres de l'item d'entrée servant de contexte aux lettres en cours de traitement. La présentation d'un mot ou d'une syllabe de ce mot au système engendre la création d'une trace de cette information en mémoire épisodique. L'apprentissage consiste à renforcer les poids de connexion entre cette unité et les unités actives dans les deux couches orthographiques et la couche phonologique. Seuls les items reconnus par le système comme étant familiers sont traités dans leur ensemble, tandis que les autres le sont analytiquement – leur traitement nécessitant alors une réorientation de l'attention.

Le principal atout de ce modèle comparé aux modèles double-voie et *PDP* est d'expliquer et de simuler la lecture des items polysyllabiques. Grâce à cette propriété, ce modèle propose une approche plus écologique des processus inhérents à la reconnaissance visuelle des mots et à la lecture. De plus, ce modèle prend en compte les processus attentionnels, qui sont généralement écartés des modèles de lecture (voir (Valdois et al., 2004)).

Nous venons de détailler les mécanismes d'identification de mots, en modalité auditive puis visuelle. Mais la compréhension d'un message verbal ne se réduit pas à l'identification des mots. L'auditeur ou le lecteur doit traiter une combinaison de mots, organisés pour constituer une phrase – unité soumise à des règles syntaxiques, porteuse d'une signification et réalisant un acte de communication –, et les phrases sont elles-mêmes organisées en ensembles de taille supérieure, les discours tels que conversations, récits, argumentations, etc.

Nous ne développerons pas cette thématique, notre travail de recherche portant exclusivement sur la reconnaissance de mots isolés. Nous ne traiterons pas non plus des processus de production de langage, écrit ou oral. Notons tout de même que les principaux modèles de production de langage sont ceux de Garrett, Dell et Levelt, ce dernier étant à ce jour le plus influent (voir (Dell, 1986; Garrett, 1982; Levelt et al., 1999)).

C.4. Conclusion

En conclusion, quatre questions majeures restent en suspens quant au traitement du langage, malgré de nombreuses études et de nombreux modèles proposés : (a) les niveaux d'analyse distinctifs correspondent-ils, psychologiquement, à des composantes de traitement distincts ? Existe-t-il une hiérarchie de 'processeurs', ou doit-on plutôt considérer le traitement du langage de manière distribuée ? (b) Outre ce problème de la nature des unités de traitement, la question reste ouverte aussi quant au fonctionnement de ces unités : les composantes langagières fonctionnent-elles en série, c'est-à-dire que chaque unité ne reçoit des informations que du niveau inférieur et n'en transmet qu'au niveau supérieur, selon un schéma d'activation de type 'bottom-up' ? Ou bien les différentes composantes fonctionnent-elles en parallèle, toutes les phases de traitement débutant en même temps, et communiquant toutes entre elles ? Dans ce cas, une partie au moins des traitements se ferait sur un mode 'top-down', c'est-à-dire qu'une analyse de haut niveau pourrait influencer les traitements plus précoces. (c) Une autre question porte sur le caractère automatique ou contrôlé des processus concernés. Rappelons qu'un processus automatique se déroule de façon irrépessible jusqu'à son terme. Il est très rapide, inconscient et ne nécessite pas de ressources cognitives. A l'inverse, un processus contrôlé est par nature plus lent, il dépend d'un certain nombre de facultés (de la capacité de la mémoire de travail entre autres), et il peut à tout moment être interrompu ou modifié. (d) Enfin, les procédures psycholinguistiques ne sont-elles qu'un cas particulier de procédures cognitives générales, ou s'agit-il de mécanismes spécifiques, relevant de dispositifs spécialisés, propres au langage ?

L'idée d'un traitement parallèle de l'information plutôt que sériel est aujourd'hui largement admise, même si les opinions divergent encore quant à l'ampleur de ce parallélisme. L'hypothèse d'une modularité stricte a été plus ou moins abandonnée, une nouvelle approche proposant maintenant qu'une représentation donnée n'est pas située quelque part dans le réseau, mais correspond à un certain pattern d'activation de celui-ci (cf. (Gaskell and Marslen-Wilson, 1999; Pulvermüller, 1998)). C'est plutôt la notion même du lexique mental qui se trouve remise en question, les questions de modularité ou connexionnisme n'ayant plus vraiment lieu d'être. En ce qui concerne la succession et

l'automatisme des phénomènes, l'idée générale actuelle est que l'accès lexical s'effectuerait de façon essentiellement automatique, commandé directement par l'input sensoriel. Les effets de contexte relèveraient d'un traitement contrôlé, plus lent, intervenant après l'accès lexical. Mais il est de plus en plus vraisemblable que l'automatisme du traitement lexical soit soumis à des influences contextuelles de type "Top-down".

Dans ce cadre particulier de la recherche en psycholinguistique, nous allons nous intéresser dans les chapitres retraçant nos résultats à ces deux aspects primordiaux du traitement du langage : nous avons en effet observé d'une part certains effets "Top-down" lexicaux et attentionnels influençant la lecture et d'autre part des caractéristiques fonctionnelles et neuro-physiologiques en rapport avec la part automatique et irréprouvable de la lecture.

Bien que les modèles connexionnistes aient l'intérêt de proposer des traitements distribués plutôt que modulaires, leur grande faiblesse est de ne pas tenir compte des contraintes neurophysiologiques. C'est dans ce contexte que la neuropsychologie et la neuroimagerie fonctionnelle ont le potentiel de redéfinir les modèles de traitement du langage normal ou anormal, en ajoutant les contraintes neurologiques appropriées. En particulier, ces approches permettent de préciser s'il y a un système neuronal spécifique à une procédure particulière, ou si l'implémentation de cette procédure est gouvernée par des patterns d'activité distribués dans les systèmes neuronaux, de façon partagée avec d'autres fonctions. Par ailleurs, la méthodologie particulière de l'EEG et de la MEG permet de caractériser le déroulement temporel d'une succession d'événements cognitifs – codant les étapes pré-lexicale et lexicale de la lecture de mots par exemple – ainsi que la modulation de ces événements par différents facteurs.

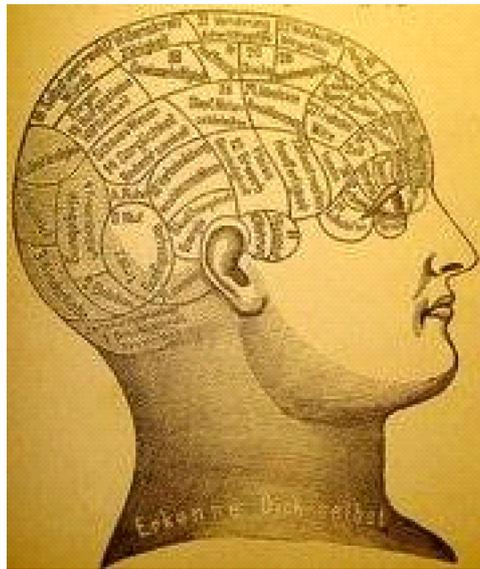
D. Neuropsycholinguistique

D.1. Introduction

L'activité langagière suppose une organisation et un fonctionnement adaptés des appareils récepteurs et effecteurs – systèmes auditif, visuel, grapho-moteur et phonatoire – d'une part, et du système nerveux central et périphérique d'autre part. La neuropsycholinguistique est l'étude des aspects pathologiques du langage, dus à une dégénérescence ou une lésion focale du système nerveux central. Les **troubles aphasiques** – du grec 'a phasis', *absence de parole* – résultent d'une atteinte limitée du système nerveux central, alors que le langage existait préalablement chez l'individu ayant subi l'atteinte. L'aphasie présente une grande variété de troubles, et on oppose généralement les troubles d'expression – orale ou écrite –, aux troubles de compréhension. Pour ce qui est de notre domaine d'étude, les troubles aphasiques de la lecture – ou **alexies**²¹ – sont subdivisés en deux grandes catégories : les alexies avec ou sans **agraphie**.

L'étude des aphasies constitue depuis le XIX^e siècle l'objet privilégié des travaux sur la pathologie langagière. Elle a été menée d'abord essentiellement dans une perspective anatomo-clinique, à laquelle est venue s'ajouter une approche neurolinguistique. La neuropsycholinguistique constitue une importante source d'information sur l'organisation neuronale du langage, permettant de mettre en relation un trouble particulier du langage avec la lésion d'une zone particulière du cortex cérébral. Elle permet aussi d'accroître les connaissances sur le fonctionnement du langage, les patients aphasiques souffrant de perturbations sélectives et différenciées de certains aspects de la capacité langagière.

D.2. Historique et modèle neurologique du XIX^e siècle



Localisation des fonctions cérébrales selon la théorie phrénologiste

La tentative de localisation des aires cérébrales du langage a débuté au XVII^e siècle avec la phrénologie, introduite par Franz Gall. Cette science décrivait le cerveau comme l'organe de la pensée, avec les facultés mentales et morales localisées dans des aires spécifiques de sa surface. Les phrénologistes tentaient d'établir une carte des fonctions cognitives basée sur la corrélation des dons et du comportement des individus avec certaines protubérances du crâne, les capacités linguistiques étant, par exemple, localisées au niveau des lobes frontaux.

A partir du XIX^e siècle, le travail de localisation des aires cérébrales du langage prend un nouvel essor, grâce à l'étude des aphasies. Le propos central de l'étude des aphasies est de déduire d'un dysfonctionnement le substrat neuro-anatomique correspondant à la fonction langagière défaillante, et ainsi d'établir une carte des aires cérébrales responsables du langage.

En 1861, Paul Broca (neurochirurgien français) rapportait le cas d'une étude post-mortem sur un patient ayant des problèmes d'articulation et d'expression du langage, sans paralysie des muscles bucco-phonatoires, et avec une compréhension relativement

²¹ Les alexies regroupent l'ensemble des troubles acquis de la lecture résultant d'une dysfonction cérébrale.

épargnée (Broca, 1861). Ce patient avait une lésion de la troisième circonvolution frontale de l'hémisphère gauche (gyrus frontal postérieur inférieur gauche, correspondant aux aires de Brodmann ²² BA 44/45). L'aire décrite, appelée plus tard aire de Broca (voir la figure 1.8), fut associée par déduction aux images motrices de la parole, sa destruction entraînant une aphasie de Broca – ou aphasie motrice.

De manière similaire, Carl Wernicke (neurologue allemand) rapportait en 1874 le cas d'une étude post-mortem d'un patient ayant des problèmes de compréhension de la parole (Wernicke, 1874). Le dommage fut identifié dans le cortex temporal supérieur postérieur gauche (BA 22/42), et cette région nommée plus tard aire de Wernicke (figure 1.8) fut associée aux images auditives de la parole, sa perte entraînant une aphasie de Wernicke – ou aphasie sensorielle. Wernicke postula par ailleurs l'existence d'une connexion directe entre les aires de Broca et Wernicke, et qu'une lésion de la matière blanche connectant ces deux aires cérébrales provoquerait chez un patient une incapacité à répéter ce qu'il entend, mais avec une compréhension et une production de la parole intactes. Ce type de syndrome de dysconnexion – appelé "aphasie de conduction" – fut rapporté par Ludwig Lichtheim (physicien allemand) en 1885 (Lichtheim, 1885). Une connexion privilégiée entre le lobe frontal postérieur et le lobe temporal supérieur avait déjà été décrite par Karl Burdach (médecin allemand), et fut confirmée ensuite par Joseph Déjerine (neurologue français) qui nomma ce "chemin" le faisceau arqué de Burdach (Dejerine, 1892).

En 1885, Lichtheim proposa aussi une extension du modèle existant "Broca - faisceau arqué - Wernicke", grâce à l'observation de différents symptômes d'aphasie. Il fit l'hypothèse d'un "chemin" additionnel entre les aires de Broca et Wernicke au travers d'un troisième 'centre' théorique, dédié au traitement sémantique, et appelé 'concept center' (Lichtheim, 1885).

En ce qui concerne la neuropsychologie de la lecture, la première contribution majeure vient de Déjerine (Dejerine, 1891; Dejerine, 1892) qui distingua deux principaux syndromes d'alexie : "l'alexie avec agraphie" et "l'alexie sans agraphie". Les alexies regroupent l'ensemble des troubles acquis de la lecture qui résultent d'une dysfonction cérébrale et qui interfèrent avec la capacité à décoder ou à transposer à haute voix le message linguistique écrit. L'alexie avec agraphie est un trouble de la lecture associé à un trouble sévère de l'écriture, avec un langage oral préservé. L'alexie sans agraphie est un trouble spécifique de la discrimination et de la reconnaissance des stimuli visuels qui constituent la langue écrite. Le trouble de la lecture affecte la compréhension du langage écrit et la transposition visuo-phonatoire (lecture à haute voix).

Déjerine publia en 1891 le premier cas de patient souffrant d'alexie avec agraphie, ayant une perte totale de la faculté de comprendre le langage écrit (alexie) associée à une perte de l'expression écrite (agrachie), à la suite d'une lésion dans le gyrus angulaire gauche. Déjerine proposa donc que le gyrus angulaire gauche soit associé à la mémoire

²² Les hypothèses localisationnistes supposent qu'à chaque zone du cerveau correspond une fonction cognitive particulière. Ces hypothèses ont conduit au début du siècle dernier à l'édification de cartes du cerveau en territoires. La principale carte de référence est aujourd'hui celle de Brodmann (1909), définissant un certain nombre d'aires, appelées aires de Brodmann, chacune numérotée et référencée selon la fonction cognitive qu'elle engage (voir Annexe 1.2).

des formes visuelles des mots. L'alexie sans agraphie – associée à des lésions dans le lobe occipital gauche et dans le splenium du corps calleux – proviendrait quant à elle d'une dysconnexion entre le gyrus angulaire gauche et le cortex visuel (Damasio and Damasio, 1983) (voir la figure 1.8).

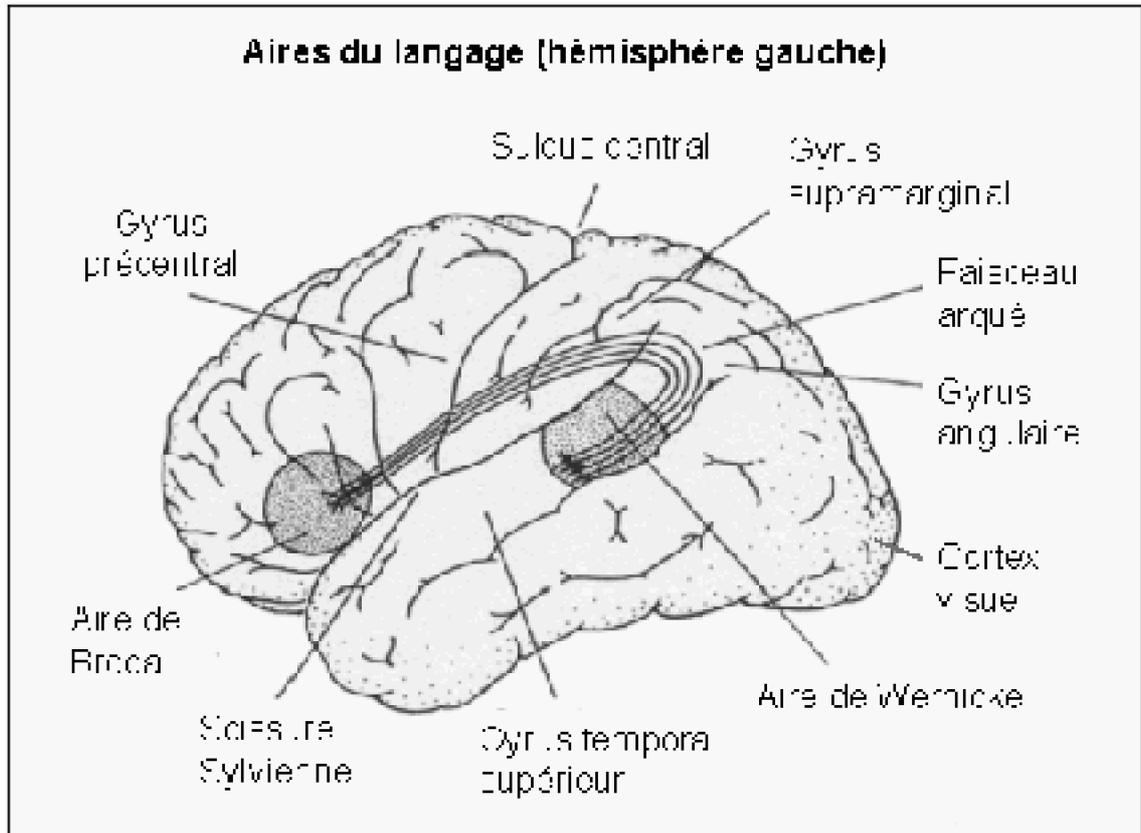


Figure 1.8 : Principales aires du langage situées dans l'hémisphère gauche cérébral.

D'après ces différentes observations, l'anatomie de la répétition de mots entendus impliquerait des traitements acoustiques dans le cortex auditif primaire, la connexion aux images auditives de la parole dans l'aire de Wernicke et aux images motrices de la parole dans l'aire de Broca, et enfin la génération de la parole dans le cortex moteur (gyrus précentral). La lecture d'un mot impliquerait quant à elle une interaction entre le traitement visuel – dans le cortex visuel – et la mémoire des formes visuelles des mots – dans le gyrus angulaire. Les connexions entre le gyrus angulaire et l'aire de Wernicke permettraient de faire le lien entre la forme visuelle d'un mot et sa forme auditive correspondante, permettant la production de parole lors de la lecture à haute voix, sous-tendue par l'aire de Broca (Geschwind, 1965). Il en découle qu'au XIX^e siècle, le modèle dominant de l'organisation cérébrale du langage est celui des courants 'associationniste' et 'néo-associationniste' illustrés par les descriptions de Lichtheim (Lichtheim, 1885) et Déjérine (Dejerine, 1892). La figure 1.9 illustre les composantes cognitives et anatomiques de ce modèle neurologique du langage.

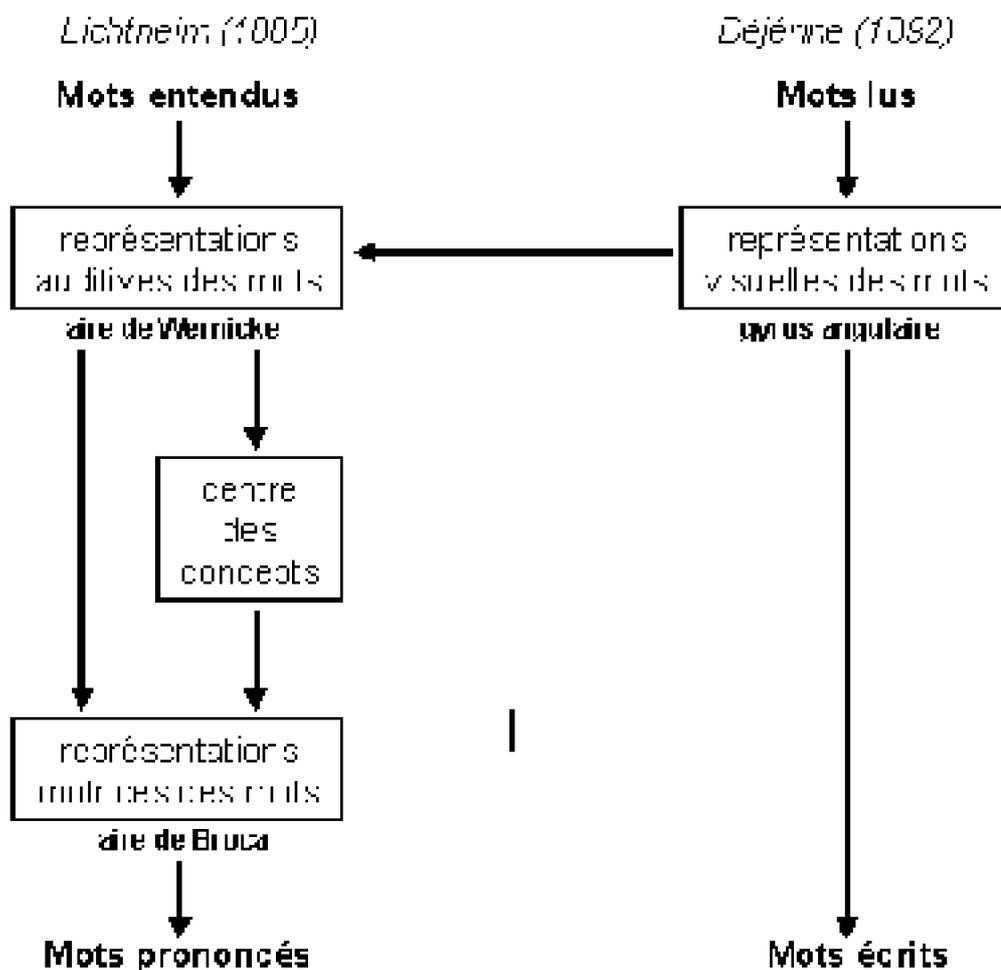


Figure 1.9 : Composantes cognitives et anatomiques du modèle neurologique du XIX^e siècle (adapté de (Price, 2000)).

Aujourd'hui encore, la communauté scientifique est unanime sur l'existence d'une "zone du langage" responsable de la plupart des fonctions langagières, située dans l'hémisphère gauche et localisée autour de la scissure de Sylvius (voir figure 1.9). Au sein de cette région, il existerait un centre à composante réceptive principale dans le lobe tempora gauche (aire de Wernicke) et un centre à composante expressive localisé plus avant dans le lobe frontal (aire de Broca) ces deux centres étant reliés entre eux par le faisceau arcue qui permettrait l'imitation des sons et favoriserait l'apprentissage de la parole. Aux deux centres principaux s'ajoute le gyrus angulaire, qui serait surtout impliqué dans le langage écrit.

D.3. Alexie et neuropsycholinguistique

Outre les apports initiaux de Broca, Wernicke et Déjerine à cette discipline, de nombreux cas de patients aphasiques ont été décrits depuis, permettant d'accroître les connaissances sur la localisation des aires cérébrales du langage. Les avancées des techniques d'imagerie anatomique et fonctionnelle ont beaucoup apporté au domaine de la neuropsycholinguistique, permettant d'étudier le cerveau de patients aphasiques sans avoir nécessairement recours à la dissection post-mortem.

A l'heure actuelle, on sait que les déficits de compréhension, impliquant à la fois le matériel auditif et visuel, sont typiquement associés à de larges lésions temporo-pariétales gauches, comprenant le gyrus temporal supérieur postérieur (aire de Wernicke), les lobes temporaux médian et inférieur ainsi que les gyri angulaire et supramarginal du lobe pariétal gauche (Alexander et al., 1989; Dejerine, 1892; Geschwind, 1965; Hart and Gordon, 1990; Kertesz et al., 1982). En ce qui concerne plus particulièrement la lecture, le tableau clinique de l'alexie peut se résumer ainsi :

- L'**alexie phonologique** est caractérisée par une difficulté majeure à lire les pseudo-mots. Le stade de traitement phonologique est déficitaire, impliquant des troubles de la lecture par conversion graphème/phonème, sans troubles de la voie directe de lecture (Beauvois and Derouesne, 1979; Derouesne and Beauvois, 1979). Elle a été associée à des lésions temporo-pariétales et frontales gauches.

- L'**alexie de surface** se caractérise principalement par une difficulté de lecture des mots irréguliers. Elle est associée à une atrophie du lobe temporal antéro-latéral (Patterson and Hodges, 1992).

- la **dyslexie profonde** est un trouble majeur de la lecture, regroupant les symptômes des alexies phonologique et de surface. Les patients atteints ont des difficultés à associer

les lettres à leurs sons. Ils ont des difficultés à lire les pseudo-mots, et les mots abstraits (plus que les mots concrets). Ils font de nombreuses erreurs sémantiques – telles que 'fusil' lu comme 'canon'. Cette pathologie se rencontre souvent comme une forme d'évolution des aphasies de type Broca.

- L'**alexie centrale** – alexie avec agraphie – est un trouble de la lecture associé à un trouble sévère de l'écriture, mais dans un tableau clinique où le langage oral est préservé. La lésion sous-jacente implique la région angulaire gauche (BA 39). S'il y a extension de la lésion au gyrus temporal postérieur, une **aphasie sensorielle** s'y rajoute.

- L'**alexie frontale** – alexie antérieure – est un trouble de la lecture faisant partie du tableau clinique de l'aphasie de Broca, où il se présente en parallèle aux troubles du langage expressif, suite à une lésion de l'aire frontale de Broca (BA 44/45).

- L'**alexie agnosique** (des lettres et/ou des chiffres) – alexie sans agraphie ou cécité verbale pure – se caractérise par l'incompréhension du langage écrit, même si le patient veut relire un de ses propres textes (les autres champs du langage étant préservés). Elle est liée à une lésion occipito-temporale gauche (Price and Mechelli, 2005), associée à une lésion du splenium du corps calleux (i.e. sa partie toute postérieure). Cliniquement, il existe une hémianopsie latérale homonyme droite et souvent des troubles de la reconnaissance d'autres symboles graphiques que les lettres (pictogrammes) ainsi qu'une agnosie des couleurs. Cohen et al. ont montré qu'un réseau alternatif occipito-temporal droit pouvait compenser la perte de son homologue gauche (Cohen et al., 2003). Ils ont également exploré les formes évolutives de cette alexie, aboutissant au syndrome de **lecture lettre-à-lettre**.

- Voisines bien que généralement moins sévères que l'alexie agnosique, les **alexies "pures"** présentent un certain nombre de caractères communs qui les opposent aux autres alexies : l'absence de troubles du langage oral à l'exception de quelques troubles de l'évocation verbale, la conservation de la stratégie perceptive de la lecture, l'intégrité de l'écriture sous dictée ou spontanée et de l'épellation, avec perturbation de la copie. Les lésions induisant des alexies pures sont occipitales (lobule lingual) et calleuses. Le rôle du corps calleux semble particulièrement déterminant : son interruption ne permettrait plus aux entrées visuelles arrivant seulement au lobe occipital droit (en raison de la présence constante d'une hémianopsie droite dans les cas d'alexie) de gagner les centres du langage dans l'hémisphère gauche.

- Certains patients hémiparétiques souffrent quant à eux d'**alexie périphérique** : l'hémiparésie est une pathologie dans laquelle le patient souffre d'une négligence de tout ce qui se passe à gauche (ou à droite) dans son espace environnant. Pour ce qui est de la lecture, les patients souffrent d'alexie périphérique puisqu'ils ne lisent que la partie gauche (ou droite) d'un texte, et la partie gauche (ou droite) des mots (Hillis and Caramazza, 1991; Luo et al., 1998).

D.4. Limitations des méthodes de neuropsychologie

Les différentes études d'aphasiologie réalisées depuis le XIX^e siècle ont apporté de nombreuses connaissances sur le langage et ses corrélats cérébraux. Malgré tout, ce

type d'études reste dépendant de nombreuses contraintes. D'une part, la description des cas cliniques est compliquée du fait de la grande variabilité des cas, et d'autre part les méthodes d'investigation neuropsychologiques ont un certain nombre de limites :

(a) Les profils neuropsychologiques peuvent être très complexes, puisqu'ils impliquent souvent plus d'un déficit cognitif. Une lésion précise est donc plus associée à un pattern complexe de déficits qu'à un déficit unique.

(b) Par ailleurs, l'étendue d'un déficit cognitif peut varier selon les compensations survenant dans la période post-lésionnelle consistant d'une part dans les stratégies adoptées par le patient pour recouvrir ses capacités (palliation cognitive) et selon les changements de la neuro-anatomie fonctionnelle (réorganisation cérébrale).

(c) De plus, certaines régions du cerveau ne peuvent être étudiées du fait de leur relative résistance aux dommages ischémiques.

(d) Une autre limitation de la méthode est qu'il est impossible de distinguer si la perte de la fonction cognitive est associée à l'aire lésée ou à la dysconnexion d'une aire épargnée.

Ainsi, tout ce qui peut être déduit de l'étude d'un déficit lésionnel est que les systèmes neuronaux intrinsèques à l'aire lésée, ou les connexions passant par cette aire, sont nécessaires à la fonction perdue.

Nous avons décrit dans la première partie de ce paragraphe la symptomatologie des aphasies (dont plus particulièrement les alexies), ainsi que les lésions cérébrales responsables des troubles. Toujours dans le cadre de la neuropsycholinguistique, il existe une autre grande classe de troubles du langage affectant particulièrement la lecture : la dyslexie. A l'inverse de l'alexie (ou dyslexie acquise), la dyslexie est un trouble développemental apparaissant au cours de l'apprentissage de la lecture, et non pas acquis à l'âge adulte. Nous allons nous intéresser plus particulièrement à ce type de trouble, notre travail de recherche étant ciblé sur cette pathologie.

D.5. La dyslexie développementale

D.5.a. Définition

Un enfant est considéré comme dyslexique (du grec 'dus lexis', *lecture défectueuse*) lorsque, en l'absence de troubles perceptifs ou neurologiques avérés et malgré une intelligence normale et un environnement scolaire adéquat, il développe des capacités de lecture significativement inférieures à la moyenne des sujets de même âge (Organisation Mondiale de la Santé, 1993). L'OMS classe ce trouble sous la rubrique F81 intitulée "troubles spécifiques du développement des aptitudes scolaires", chapitre "trouble spécifique de la lecture" (F81.0). On estime à 500 000 le nombre d'enfants, en France, souffrant de "dyslexie développementale", cette estimation s'élevant à 5 à 17.5% de la population si l'on considère les adultes ayant des séquelles de dyslexie (Shaywitz, 1998). Cette variabilité vient de la définition vague de la maladie et du nombre important de facteurs pris en compte (Demonet et al., 2004). Le ratio garçons-filles est de 3 pour 2 à 5

pour 4 selon les études. De plus, la fréquence de la maladie dans la population varie en fonction de la langue, étant plus importante dans les populations de langue maternelle anglaise plutôt qu'italienne par exemple (Lindgren et al., 1985). La dyslexie représente la deuxième affection neurologique la plus fréquente juste après la migraine.

D.5.b. Symptomatologie

La dyslexie est un déficit sévère et durable dans les processus d'acquisition de la lecture. Dès le début de l'apprentissage, l'enfant présente des difficultés majeures entre autres dans l'association graphèmes-phonèmes. Contrairement au retard simple de lecture, ces difficultés vont persister après un éventuel redoublement du cours préparatoire et souvent en dépit de la rééducation orthophonique. Vers l'âge de 8 ans, l'enfant peut être totalement en échec vis-à-vis de la lecture, tout juste capable de reconnaître quelques mots simples qu'il a mémorisés, après 2 ans de scolarité régulière. Un retard de lecture de 12 à 18 mois par rapport au niveau scolaire, chez des enfants de moins de 9 ans, est considéré comme significatif. Même lorsque l'enfant a pu faire quelques acquisitions, la lecture reste lente, demandant un effort soutenu, entrecoupée par de fréquentes pauses devant des mots longs ou inconnus, pour lesquels l'enfant a recours au déchiffrement alphabétique. La compréhension de textes écrits est souvent fragmentaire, l'enfant cherchant à deviner d'après le contexte, plutôt qu'à extraire la signification du texte lui-même. A la dictée, comme au texte libre, de graves erreurs orthographiques apparaissent : outre des fautes d'usage ou d'accord, non spécifiques, on constate des omissions de syllabes, des mots mal découpés, des confusions entre les sons ; le graphisme est souvent maladroit, peu soigné, témoignant du faible investissement de l'enfant dans cette activité. Certaines fautes typiques reviennent souvent : confusions de lettres symétriques (b/d, p/q) ou inversions de graphèmes – même si ces erreurs ne sont pas spécifiques de la dyslexie. Les difficultés scolaires sont en principe limitées aux domaines de la lecture et de l'orthographe. Cependant, il peut exister des confusions sur certains symboles mathématiques, et les difficultés de lecture et de compréhension de textes écrits peuvent perturber les autres activités scolaires. Les tests neuropsychologiques tels que le WISC (échelle de QI chez l'enfant) révèlent en général des résultats inférieurs aux épreuves verbales par rapport aux épreuves de performance (non verbales). Par la suite, l'examen orthophonique permet de préciser l'importance des troubles du langage écrit. Des tests spécifiques étalonnés, évaluant la vitesse de lecture et le nombre d'erreurs, montrent un retard de plus de deux ans par rapport aux performances moyennes des enfants de même âge.

Les enfants dyslexiques souffrent fréquemment de troubles associés tels que des troubles de l'acquisition du langage oral, du geste de l'écriture – la dysgraphie –, des capacités de calcul – la dyscalculie –, de la coordination motrice – la dyspraxie –, de la posture et de la dextérité, de l'orientation temporelle – la dyschronie –, des habiletés visuospatiales et attentionnelles – hyperactivité et 'attention deficit disorder' (Dewey, 1995; Gross-Tsur et al., 1996; Gross-Tsur et al., 1995; Rapin and Allen, 1988; Weintraub and Mesulam, 1983). Certaines difficultés rencontrées par les enfants dyslexiques peuvent persister à l'âge adulte, et il s'agit d'un facteur majeur d'illettrisme, d'échec scolaire et d'exclusion sociale. Le handicap potentiel est globalement considérable et très

variable selon les individus.

D.5.c. Critères de diagnostic

Les critères de diagnostic décrits par l'OMS sont les suivants :

A. L'un des deux points suivants doit être présent

un score de capacité de lecture et/ou de compréhension se situant au moins 2 erreurs standard en dessous du niveau attendu sur la base de l'âge chronologique et l'intelligence générale de l'enfant, les aptitudes de lecture de même que le QI étant évalués sur un test administré individuellement et standardisé par rapport au niveau culturel et au système éducatif de l'enfant.

un antécédent de difficultés sévères de lecture, ou des scores aux tests satisfaisant au critère A (1) à un plus jeune âge, plus un score à un test d'orthographe se situant au moins 2 erreurs standard en dessous du niveau attendu sur la base de l'âge chronologique et du QI de l'enfant.

B. Le trouble décrit au critère A interfère de façon significative avec la réussite scolaire ou les activités de la vie quotidienne nécessitant des aptitudes de lecture.

C. Le trouble n'est pas la conséquence directe d'un déficit d'acuité visuelle ou auditive, ou d'une affection neurologique.

D. La fréquentation scolaire est dans la moyenne de ce que l'on peut attendre (c'est-à-dire qu'il n'y a pas eu d'inadéquation majeure dans la scolarisation).

E. *Critère d'exclusion très habituellement utilisé* : QI inférieur à 70 sur un test standardisé administré individuellement. (d'après (Habib, 1997)).

D.5.d. Différents sous-types de dyslexies développementales

Plusieurs sous-types de dyslexie sont décrits selon que prédominent des troubles phonétiques et/ou des troubles visuels et orthographiques, ces variantes correspondant possiblement à des anomalies d'organisation de populations de neurones dans différentes régions cérébrales (cortex associatif pariétal inférieur, temporal inférieur, occipital médian). Ainsi, certaines dyslexies seraient liées à une difficulté première à manipuler les sons du langage, d'autres à une difficulté à traiter l'image visuelle que représente le mot.

Certains auteurs (Boder, 1973; Castles and Coltheart, 1993; Mattis et al., 1975; Mitterer, 1982) ont proposé de distinguer trois types différents de dyslexie : la **dyslexie phonologique**, la **dyslexie de surface** (ou orthographique) et la **dyslexie mixte** associant les deux types de troubles. D'après les modèles de lecture à double-voie (voir paragraphe C.3.c, chapitre psycholinguistique), les mots écrits peuvent être décodés de deux façons différentes (Coltheart et al., 1993) :

(1) soit directement par un décodage orthographique – le mot est reconnu dans son ensemble, sa forme visuelle faisant référence à une forme connue contenue dans le lexique orthographique d'entrée.

(2) soit indirectement en passant d'abord par un transcodage grapho-phonémique –

les groupes de lettres sont alors traduits en unités du langage oral.

Ces deux voies de lecture sont dénommées respectivement voie d'adressage et voie d'assemblage. Les **dyslexiques de surface** ont plus de difficulté pour lire les mots irréguliers que les pseudo-mots²³, ce qui suggère que le déficit porte principalement sur la voie orthographique (Castles and Coltheart, 1993) ; les mots irréguliers comme 'tabac' sont "régularisés", c'est-à-dire produits à l'oral sous la forme /tabak/. Les **dyslexiques phonologiques** ont davantage de difficultés pour lire les pseudo-mots, ce qui traduirait une atteinte prépondérante de la voie phonologique d'assemblage ; ils présentent aussi de très grandes difficultés dans les épreuves de conscience phonologique, tâches impliquant la manipulation consciente des sons élémentaires constitutifs des mots, comme dans la tâche dans laquelle il est demandé au sujet de répéter un mot en supprimant le premier son du mot : par exemple répéter le mot "trapèze" en omettant le premier phonème (/t/), c'est-à-dire /rapɛz/. Ainsi, certains sujets souffrent de problèmes de décodage phonétique mais pas de reconnaissance visuelle : ils lisent en faisant beaucoup d'erreurs en tentant de deviner les mots sur la base de leur forme globale. Ils souffrent de dyslexie phonologique (ou dysphonétique), et représenteraient pour les auteurs anglo-saxons les 2/3 de la population dyslexique. Les sujets révélant une procédure d'analyse phonétique préférentielle font moins d'erreurs, mais au prix d'une lecture particulièrement lente, chaque mot étant laborieusement décodé par syllabation. Ces dyslexiques de surface (ou dyséidétiques) représenteraient moins de 10% de la population dyslexique, les derniers souffrant d'une association des deux types de troubles (Boder, 1973).

Cette classification des troubles dyslexiques est de plus en plus remise en cause. Par exemple, les dyslexiques – comparés à des enfants de même âge de lecture – montrent un déficit principal dans leurs aptitudes phonologiques plutôt qu'orthographiques, qu'ils soient plus lents ou commettent plus d'erreurs (Sprenger-Charolles et al., 2000). Ces résultats minimisent l'importance de la dissociation entre les deux profils et suggèrent que la dyslexie développementale pourrait être principalement causée par un déficit phonologique sous-jacent.

D.5.e. Description des troubles

Trois principales voies de recherche en neurosciences ont été explorées ces dernières années, pour tenter de décrire les troubles dyslexiques : la théorie phonologique, la théorie visuelle et la théorie temporelle.

Déficit de traitement phonologique

L'hypothèse explicative des troubles dyslexiques la plus répandue est celle d'un déficit de traitement des informations phonologiques (Frith, 1997; Snowling, 1981; Snowling, 2000). De nombreuses études ont montré que les enfants dyslexiques, comparés à des enfants normo-lecteurs, ont des difficultés à réaliser des tâches de traitement phonologique telles

²³ Les pseudo-mots sont des séquences de lettres prononçables mais n'ayant aucune signification dans la langue considérée (exemple : MABLE)

que la répétition de non-mots, la fluence phonémique, la dénomination d'images, l'apprentissage phonologique, la conscience phonémique ou le test de mémoire verbale à court terme (voir (Valdois et al., 2004)).

L'idée principale est que les enfants dyslexiques souffriraient d'une déficience de conscience phonologique (Paulesu et al., 2001) : les enfants les moins performants en lecture sont ceux qui ont le plus de difficultés à segmenter les mots en phonèmes (Liberman, 1973; Morais et al., 1984). Lundberg et al. ont montré que des enfants entraînés à des exercices de segmentation de mots en phonèmes ou syllabes voyaient leurs capacités en lecture augmenter significativement (Lundberg et al., 1988). L'idée principale de la théorie phonologique est que les dyslexiques souffriraient d'un déficit au niveau de la représentation même des phonèmes. La meilleure démonstration de ce trouble est la difficulté qu'ont les dyslexiques dans les tâches de perception catégorielle. Différentes études suggèrent que les dyslexiques sont moins catégoriels que les normo-lecteurs dans la façon qu'ils ont de percevoir les contrastes phonétiques. Ceci se traduit par des difficultés majeures à catégoriser comme 'ba' ou 'da' un continuum acoustique artificiel entre les deux syllabes (Godfrey et al., 1981; Manis et al., 1997; Reed, 1989; Werker and Tees, 1987). D'autres études montrent que les dyslexiques sont déficitaires pour discriminer deux phonèmes différents, mais qu'ils sont plus performants pour discriminer deux variants acoustiques du même phonème (Godfrey et al., 1981). Les différences de perception catégorielle entre dyslexiques et normo-lecteurs pourraient fournir une explication de leur déficit de conscience phonologique et par conséquent de leurs difficultés en lecture. Des stimuli auditifs dont la structure normale des fréquences est remplacée par des tons purs (sinusoïdaux) (Remez et al., 1981) ont été utilisés dans une étude comparative entre enfants dyslexiques et témoins. Cette étude comportementale montre que les dyslexiques ne se différencient pas des témoins en contexte non linguistique, alors que des différences significatives apparaissent pour les mêmes stimuli en contexte de parole. Ces différences indiquent que les dyslexiques sont moins catégoriels que les témoins, non pas dans le sens où ils ne discriminent pas aussi bien les sons inter-catégoriels que les témoins, mais au contraire en ce qu'ils perçoivent presque autant les différences intra-catégorielles qu'inter-catégorielles (Serniclaes et al., 2001).

Bien que la majorité des sujets dyslexiques souffrent de troubles phonémiques (Ramus et al., 2003), la théorie purement phonologique de la dyslexie ne peut rendre compte des déficits visuels, sensoriels et moteurs dont souffrent un grand nombre de patients (Demonet et al., 2004). Ainsi, les troubles de lecture des pseudo-mots et de conscience phonologique pourraient résulter d'un déficit de traitement phonologique, et les troubles de lecture des mots irréguliers sans troubles phonologiques devraient être expliqués par un déficit cognitif différent, non phonologique (Valdois et al., 2004).

Déficit de traitement visuel

Certains travaux ont démontré la fréquence, dans des populations de dyslexiques, de troubles de la vision binoculaire, d'une irrégularité des mouvements de poursuite et de 'scanning' visuel d'une cible en mouvement, d'une anomalie des saccades oculaires et des fixations lors de la lecture. Mais ces anomalies pourraient tout aussi bien participer à

la genèse du trouble dyslexique qu'en être la conséquence. En revanche, divers arguments ont suggéré l'importance potentielle d'un trouble de la perception visuelle à un bas niveau d'intégration, concernant spécifiquement la persistance visuelle et la sensibilité aux contrastes et aux scintillements. Certains dyslexiques font des erreurs typiques de ce trouble, qui sont des confusions de lettres symétriques (b/d) ou visuellement proches (m/n), ces erreurs ne pouvant à priori pas être attribuées à un problème de traitement phonologique (Valdois et al., 1995). Les dyslexiques nécessiteraient des fréquences spatiales 10 fois plus faibles pour percevoir les mêmes contrastes que les enfants non dyslexiques. Ce déficit dans la sensibilité aux contrastes pourrait affecter 75% des dyslexiques, spécialement ceux ayant un déficit phonologique associé (Cornelissen et al., 1998; Eden et al., 1996b; Lovegrove et al., 1990). Ces anomalies pourraient être liées au mauvais développement d'une partie des voies visuelles – système magnocellulaire – qui, de la rétine au cortex, transmet spécifiquement les informations visuelles rapides et peu contrastées²⁴ (Eden et al., 1996a; Livingstone et al., 1991). Cette théorie est loin de faire l'unanimité (Ramus et al., 2003), mais son intérêt reste tout de même qu'elle permettrait de rendre compte aussi des autres formes de dyslexies et de déficits (phonologique et/ou visuel), dans la mesure où le système magnocellulaire a été décrit dans les voies visuelles et auditives (Galaburda et al., 1994; Stein, 2001; Stein, 2003).

Outre un déficit de traitement des informations visuelles rapides, les dyslexiques semblent souffrir de problèmes visuo-attentionnels sévères (Valdois et al., 2004). Dans les tâches de détection automatique de lettres, les dyslexiques ne diffèrent pas des témoins en temps de recherche, alors qu'ils sont significativement plus longs en détection attentionnelle. Illes et al. (Illes et al., 2000) ont montré que les dyslexiques souffraient d'un déficit de l'attention visuelle, probablement dû à une atteinte du cortex pariétal (zone d'intégration principale des informations visuelles provenant du système magnocellulaire). Les troubles de lecture des dyslexiques pourraient être dus à une mauvaise inhibition des informations visuelles périphériques, ainsi qu'au fait que l'empan visuo-attentionnel est plus réduit chez les faibles lecteurs et ne s'adapte pas à la longueur du mot à traiter (Facoetti et al., 2000; Geiger et al., 1992). Ainsi, les dyslexiques présentent un trouble de l'attention perceptive dans des tâches de détection simple, auditive et visuelle (Facoetti et al., 2003), sans problèmes attentionnels généraux (Bednarek et al., 2004).

Déficit de traitement des informations rapides (théorie temporelle)

Une autre hypothèse, qui pourrait réconcilier les deux types de déficits visuel et phonologique, postule que les différents troubles dyslexiques proviennent d'un déficit unique dans le traitement des changements ou successions rapides d'information. Ce problème de traitement des informations rapides concernerait le langage oral, mais aussi les sons non langagiers, ou encore les stimuli visuels ou sensori-moteurs (Tallal et al., 1985). Bien que cette théorie concerne les modalités auditive et visuelle, la majorité des études – conduites principalement par l'équipe de Tallal – ont été réalisées en modalité

²⁴ Le système magnocellulaire transmet les informations visuelles rapides et peu contrastées, par opposition au système parvo-cellulaire qui transmet les informations visuelles plus précises, à fort contraste, de même que la vision des couleurs.

auditive : un enfant indemne de troubles de l'apprentissage est capable de percevoir comme distincts deux sons séparés d'un intervalle de moins de 20 ms, alors qu'un groupe d'enfants dysphasiques²⁵ et dyslexiques ne peut les distinguer qu'à partir d'un intervalle de 200 à 400 ms. Or, ces enfants ont des difficultés à discriminer des syllabes qui ne diffèrent que par un trait phonétique (par exemple 'da'/'ba') (Adlard and Hazan, 1998; Mody et al., 1997; Reed, 1989). Le signal acoustique de la parole est constitué de fréquences fondamentales et d'harmoniques (appelées formants) pour les voyelles, alors que les consonnes consistent essentiellement en de brèves transitions (quelques dizaines de ms) dans les caractéristiques de ces formants. Ainsi, Tallal présume qu'un trouble du traitement des caractéristiques temporelles des sons serait à l'origine du trouble de l'apprentissage des dyslexiques en raison d'un défaut subtil dans le traitement des sons du langage, lié à l'incapacité de ces enfants à discriminer les transitions entre consonnes et voyelles (Tallal, 1980; Tallal et al., 1996). L'incapacité des dyslexiques à traiter les informations acoustiques rapides semble résulter d'un déficit d'activation des aires préfrontales gauches (Temple et al., 2000).

Bien que l'on considère généralement que la forme prépondérante de la dyslexie est liée à un déficit phonologique, l'origine ontogénétique de ce déficit demeure controversée. Actuellement, deux explications sont proposées, l'une en lien avec des processus auditifs, et l'autre liée aux représentations en mémoire à long terme d'unités constitutives de la parole. Les tenants du modèle auditif nous semblent mettre l'accent sur des troubles de type "bottom-up", le problème central concernant le traitement des sons présentant des variations rapides, quelle qu'en soit l'origine (Tallal, 1980). C'est la perception de la parole qui est en cause pour les tenants du modèle phonétique (Mody et al., 1997; Schulte-Korne et al., 1998; Serniclaes et al., 2001). Selon cette dernière théorie, la dyslexie seraient associée à des troubles de type "top-down" des représentations linguistiques de la parole.

D.5.f. Causes des troubles

Différentes hypothèses ont été avancées pour expliquer la dyslexie. Ces hypothèses sont d'ordre neurologique et génétique, deux théories qui ne semblent pas incompatibles.

Anomalies neurologiques

L'idée que la dyslexie pouvait avoir une origine neurologique a été avancée par Hinshelwood, qui proposait – sur la base des observations de sujets alexiques par Déjerine – que les difficultés de lecture et d'écriture chez ses jeunes patients dyslexiques pouvaient être dues à un développement anormal de la même région pariétale qui était endommagée chez les patients alexiques (Hinshelwood, 1917).

Après le premier cas étudié en 1968 (Drake, 1968), différentes études anatomiques post-mortem de cerveaux de dyslexiques ont révélé la présence d'ectopies corticales²⁶

²⁵ la dysphasie est un trouble de l'apprentissage du langage oral.

²⁶ Malformations microscopiques du cerveau dues à un défaut de migration des cellules au cours de la maturation cérébrale de l'embryogenèse.

(Geschwind, 1979) et de microgyri (Evrard et al., 1992), principalement dans les régions périsylviennes de l'hémisphère gauche (Galaburda et al., 1985), confirmant la thèse de l'origine neurologique des troubles dyslexiques et suggérant un développement cortical anormal.

Deux autres types de malformations ont aussi été référencées : l'existence de dysplasies focales organisées en grands neurones anarchiquement dispersés depuis la matière blanche sous-jacente jusqu'au cortex cérébral, et des anomalies sous-corticales siégeant sur les noyaux thalamiques.

Il semble que les patients dyslexiques souffrent aussi d'un trouble du transfert d'informations sensorielles et motrices entre les hémisphères, impliquant le corps calleux (Gross-Glenn and Rothenberg, 1984; Markee et al., 1996; Moore et al., 1995). Le corps calleux est la principale commissure interhémisphérique, la grande majorité des informations qui sont transmises d'un hémisphère à l'autre du cerveau le sont donc par l'intermédiaire de ses fibres. Le corps calleux aurait une taille significativement plus importante chez les dyslexiques que chez les normo-lecteurs (Robichon and Habib, 1998). Cette variation de taille du corps calleux des dyslexiques pourrait être due à un problème de concentration en testostérone (Moffat et al., 1997), mais pourrait aussi uniquement résulter d'une remédiation intensive, puisqu'il a aussi été montré qu'un entraînement intensif chez des musiciens pouvait affecter la morphologie calleuse (Schlaug et al., 1995).

Une autre théorie propose que les différents troubles dyslexiques et associés soient dus à une hypoactivation du cervelet (Nicolson et al., 2001), des anomalies du lobe antérieur de l'hémisphère droit du cervelet relié aux aires motrices frontales et à l'aire de Broca étant observées chez des sujets dyslexiques (Eckert et al., 2003). Cependant, des déficits cérébelleux ne sont pas observés systématiquement chez tous les patients dyslexiques.

La signification fonctionnelle de ces différences anatomiques entre sujets normo-lecteurs et dyslexiques n'a pas encore été élucidée, bien que de nombreuses études aient été réalisées sur des sujets humains et des modèles animaux (voir (Eckert, 2004; Habib, 2000; Ramus, 2004)).

Par ailleurs, une autre hypothèse neurologique a été proposée par Orton (Orton, 1925), fondateur de la théorie de la latéralisation atypique : la latéralisation des fonctions du langage dans l'hémisphère gauche (voir paragraphe E.2.a) serait défaillante chez les dyslexiques, de sorte que les pré-requis nécessaires à l'apprentissage de la lecture ne seraient pas présents. Plus tard, sur la base de la théorie de Bakker (Bakker et al., 1990), l'hypothèse a été avancée que chez les dyslexiques l'hémisphère droit participe de façon anormalement importante au langage, en raison d'un défaut de spécialisation des aires du langage à gauche. Les analyses post-mortem de cerveaux de dyslexiques confirment cette hypothèse : tous les cerveaux de dyslexiques étudiés par l'équipe de Boston (Galaburda et al., 1990; Galaburda et al., 1985) de même que celui de l'enfant dysphasique étudié par Cohen et al. (Cohen et al., 1989) montraient, en plus des ectopies, une absence de l'asymétrie gauche > droite usuelle du planum temporal. Bien qu'il y ait une tendance globale, dans la littérature, à confirmer les observations de Galaburda et al. grâce aux études *in vivo* menées en IRM, il existe des exceptions pour

lesquelles les auteurs n'ont trouvé aucun problème de symétrie des lobes temporaux chez des dyslexiques (voir par exemple (Green et al., 1999)). Des problèmes de symétrie des lobes frontaux et pariétaux ont aussi été observés dans quelques études, mais ce type de travaux n'en est encore trop qu'à ses débuts pour pouvoir tirer des conclusions certaines. D'autre part, un pattern inversé de la taille du gyrus angulaire (Droit > Gauche) a été retrouvé à plusieurs reprises chez des enfants dyslexiques (Lubs et al., 1991; Plante et al., 1991).

Probable origine génétique des troubles

Des études de familles de sujets dyslexiques ainsi que de jumeaux ont conduit les chercheurs à postuler l'existence d'un facteur génétique dans la dyslexie développementale (DeFries et al., 1987), avec une transmission autosomale dominante (Hallgren, 1950). DeFries et al. ont montré que si un jumeau homozygote est dyslexique, le second a 68% de risques de l'être aussi, alors que dans le cas de jumeaux hétérozygotes, cette probabilité n'est que de 38%. Une étude menée sur une vaste population a retrouvé pour un garçon dyslexique un antécédent paternel dans 40% des cas et maternel dans 35% des cas, ce qui représente un risque 5 à 7 fois plus élevé que dans une population témoin (Vogler et al., 1985). Pour les filles les taux sont plus faibles (17 à 18% pour un des deux parents) ce qui représente tout de même 12 fois le risque des témoins. Aucun gène responsable de la dyslexie n'a été séquencé jusqu'à ce jour, mais un certain nombre de régions sensibles ont été localisées sur les chromosomes 1,2, 3, 6, 15 et 18 (Fagerheim et al., 1999; Fisher et al., 1999; Flint, 1999).

La transmission génétique est probablement très complexe puisque non élucidée à ce jour : différentes formes de dyslexies pourraient survenir dans une même famille, alors que différents gènes sont impliqués dans différents aspects de troubles de la lecture (Fisher and DeFries, 2002). La contribution génétique semble être plus importante pour les dyslexiques phonologiques que pour les dyslexiques de surface, ce qui suggère que l'influence environnementale est significative pour le dernier groupe (Castles et al., 1999). Cette influence environnementale pourrait provenir de l'environnement prénatal, bien que ceci ne soit que spéculatif pour l'instant (Bryden et al., 1994; Geschwind and Behan, 1982). Il existe aujourd'hui un consensus avançant l'idée d'un lien complexe entre le fait d'être non-droitier, d'être sujet à des maladies immunitaires, d'être un homme (sécrétions hormonales spécifiques) et d'être sujet à des troubles de l'apprentissage verbal. La nature de ce lien, bien qu'il soit très probablement génétique, reste totalement spéculative (Hugdahl, 1994).

D.5.g. Conclusion

Il existe quelques cas de dyslexie développementale montrant une double dissociation entre les troubles phonologiques et visuo-attentionnels (Valdois et al., 2003; Valdois et al., 2004). Ainsi, la dyslexie développementale pourrait résulter de déficits de traitement phonologique de l'information, de déficits visuo-attentionnels ou de la combinaison des deux (Valdois et al., 2004).

La dyslexie pourrait aussi résulter d'une difficulté générale pour le cerveau – plus

particulièrement l'hémisphère gauche – à intégrer les variations rapides de stimuli auditifs et visuels (Tallal et al., 1996). La figure 1.10 illustre comment les différents troubles du syndrome dyslexique pourraient être expliqués par un déficit général de codage temporel de l'information (Habib, 2000).

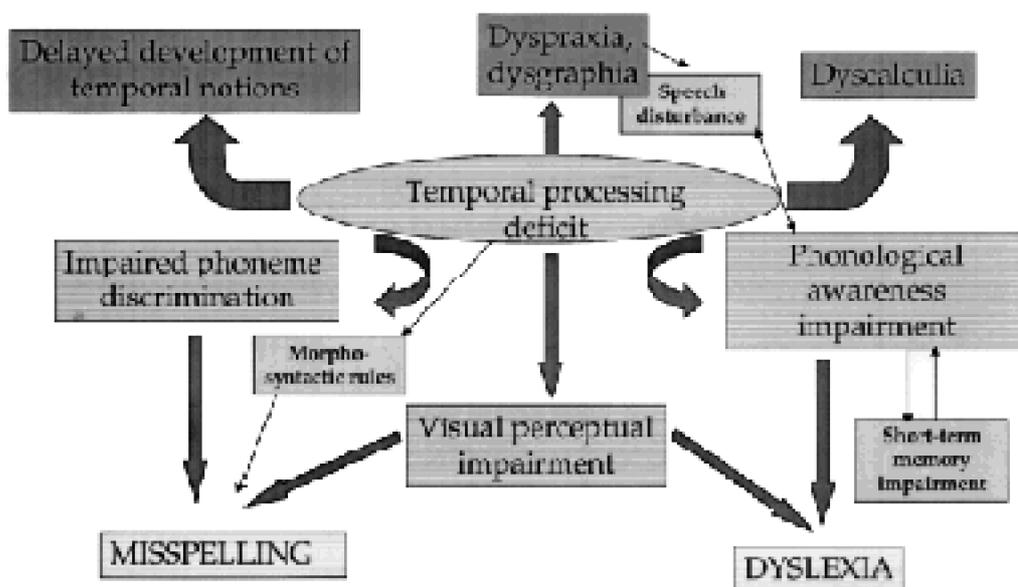


Figure 1.10 : Hypothèse sur les mécanismes de la dyslexie et des troubles développementaux associés (d'après (Habib, 2000)).

Par ailleurs, différents auteurs suggèrent qu'il n'existe probablement pas une théorie unitaire explicative du trouble dyslexique, mise à part l'importance d'un trouble de l'automatisation des processus cognitifs (Demonet et al., 2004; Ramus et al., 2003). Les dyslexiques souffriraient d'un trouble général de mémoire à court terme et de mémoire de travail ne leur permettant pas de manipuler aisément l'information linguistique visuelle et auditive, ce qui entraînerait entre autre un déficit d'automatisation des processus, habileté indispensable à la lecture experte.

Les travaux de neuropsycholinguistique ont apporté de nombreuses connaissances sur les fonctions langagières, grâce aux études post-mortem et *in vivo* de patients souffrant de troubles du langage, acquis ou développementaux. Nous allons maintenant décrire les données de la littérature venant compléter ces connaissances, grâce à des études fonctionnelles *in vivo* chez des sujets 'sains'.

E. Langage et neurolinguistique

La neurolinguistique étudie les fondements biologiques de notre aptitude au langage. Cette discipline est née dans les années 30, faisant suite aux études aphasiologiques menées au XIX^e siècle. Elle s'est efforcée d'ajouter aux observations cliniques de la

neuropsycholinguistique les apports de la psycholinguistique (voir chapitre C) et de la linguistique cognitive, de manière à comprendre comment le langage fonctionne au niveau anatomique. L'une des questions majeures qu'elle se pose est de savoir si les diverses facultés dont nous avons besoin pour produire le langage sont le fait de structures cérébrales distinctes ou d'associations de structures. Dans ce domaine, les chercheurs utilisent principalement les méthodes d'imagerie cérébrale, dont l'avantage principal est d'observer l'activité du cerveau 'in vivo' et de manière relativement non invasive, chez des sujets psychologiquement et physiologiquement sains. Sur le plan épistémologique, l'imagerie cérébrale prend la suite de la neuropsycholinguistique appliquée aux aphasies, dans l'étude des relations cerveau/langage. Les tâches d'activation appliquées aux sujets sains – avec les outils d'enregistrement – remplacent les tests de langage chez les patients aphasiques, et les foyers d'activation ainsi observés remplacent les observations de lésions.

En particulier, l'imagerie fonctionnelle permet d'identifier des spécialisations fonctionnelles dans des régions cérébrales naturellement épargnées par les lésions, ou bien avec une activité fonctionnelle préservée à la suite d'un dommage, du fait de la réorganisation cognitive ou neuronale. Elle permet aussi d'identifier des sites fonctionnant anormalement en l'absence de tout dommage, ou encore des lésions étendues, qui ne touchent pas qu'une seule zone fonctionnelle. Ces techniques, contrairement aux études lésionnelles, ne sont pas limitées à la supposition que les procédures et opérations cognitives sont confinées à des modules anatomiques discrets (ségrégation fonctionnelle), et tiennent compte au contraire de la spécialisation fonctionnelle émergeant de l'interaction entre deux aires ou plus (intégration fonctionnelle). Notons ici la grande complémentarité des techniques, la neuroimagerie fonctionnelle permettant d'identifier l'ensemble des régions impliquées dans une tâche par rapport à une autre, et les modèles de déficits lésionnels permettant d'identifier lesquelles de ces régions (ou connexions) sont indispensables à une composante particulière de la tâche.

Après avoir décrit les principaux outils d'imagerie utilisés en neurolinguistique, nous passerons en revue les connaissances actuelles sur le sujet, en distinguant l'identification de mots en modalité auditive ou visuelle, dans des tâches actives ou passives.

E.1. Principales techniques d'imagerie

L'avènement des techniques d'imagerie fonctionnelle cérébrale, à la fin du XX^e siècle, a ouvert de nouvelles perspectives en permettant l'étude en temps réel du cerveau en action, chez des sujets sains. Il existe deux grands types de techniques d'investigation de l'anatomie fonctionnelle du cerveau humain. Les techniques électromagnétiques – les Potentiels Evoqués (PE) et la magnéto-encéphalographie (MEG) – fournissent une information directe sur l'activité synaptique des neurones. Les techniques hémodynamiques – la Tomographie par Emission de Positons (TEP) et l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) – procurent des informations indirectes sur l'activité cérébrale en mesurant les variations de flux sanguin induites par l'activité neurale. Ces deux types de techniques fournissent des résultats de sensibilités variables, et sont donc utilisés dans différents protocoles en fonction de la problématique du travail

de recherche : les méthodes électromagnétiques ont une excellente résolution temporelle de l'ordre de quelques millisecondes, mais une faible résolution spatiale de l'ordre de plusieurs centimètres. Ces techniques fournissent des enregistrements de surface, ce qui a l'avantage d'être non invasif, mais les données sont en contrepartie peu informatives sur la localisation des activations en profondeur. Les méthodes hémodynamiques se caractérisent par une résolution spatiale de l'ordre du millimètre, mais une résolution temporelle d'une à quelques secondes, c'est-à-dire insuffisante au regard du "timing" cognitif de l'ordre de la dizaine de millisecondes. Ces méthodes, beaucoup plus lourdes et coûteuses, fournissent des données dans un volume cérébral, ce qui permet de localiser les activations de manière très précise.

E.1.a. Les Potentiels Evoqués

La technique des Potentiels Evoqués, utilisée dans le domaine cognitif depuis une trentaine d'années, est employée pour déchiffrer la chronométrie des processus de traitement du langage (Näätänen, 1987; Segalowitz and Chevalier, 1998). Cette technique est basée sur un enregistrement de l'ElectroEncéphaloGramme (EEG), mis au point en 1929 par Hans Berger. Les potentiels évoqués (PE) ou Event-Related Potentials (ERPs) sont des fluctuations électriques (de l'ordre du microvolt) recueillies à la surface du scalp, et résultant de l'activité électrique neurale sous-jacente (Guerit, 1998). Ils peuvent être définis comme les modifications de l'activité électrique cérébrale consécutives à l'application d'une stimulation. La moyenne des mesures lors d'essais successifs permet d'extraire la réponse évoquée par une stimulation en s'affranchissant de l'activité électrique spontanée indépendante de la stimulation (bruit physiologique).

La technique consiste en un enregistrement de l'EEG qui reflète les variations de potentiels de membrane des cellules pyramidales du cortex. Les signaux obtenus sont une succession de différentes composantes (ou ondes) désignées par leur polarité (N = négative et P = positive) suivie d'un nombre qualifiant ou bien leur ordre d'apparition (1, 2...) ou bien leur latence moyenne – en millisecondes – chez les sujets "normaux" (180, 300...) (voir la figure 1.11). Selon le type de stimulation, ces composantes peuvent varier en latence²⁷ et en amplitude. L'analyse de ces différentes caractéristiques permet l'étude dynamique du fonctionnement cognitif. Il faut cependant noter que ces composantes sont observées à la surface du scalp. Compte tenu de la diffusion des courants dans la boîte crânienne, il n'y a pas nécessairement de correspondance entre un maximum de potentiel en surface et l'activité du cortex sous-jacent.

²⁷ Contrairement à ce que semble indiquer le terme, et contrairement à son utilisation en électrophysiologie cellulaire, la latence ne désigne pas le délai d'apparition du phénomène mais celui de son maximum (valeur temporelle au maximum d'amplitude du pic)

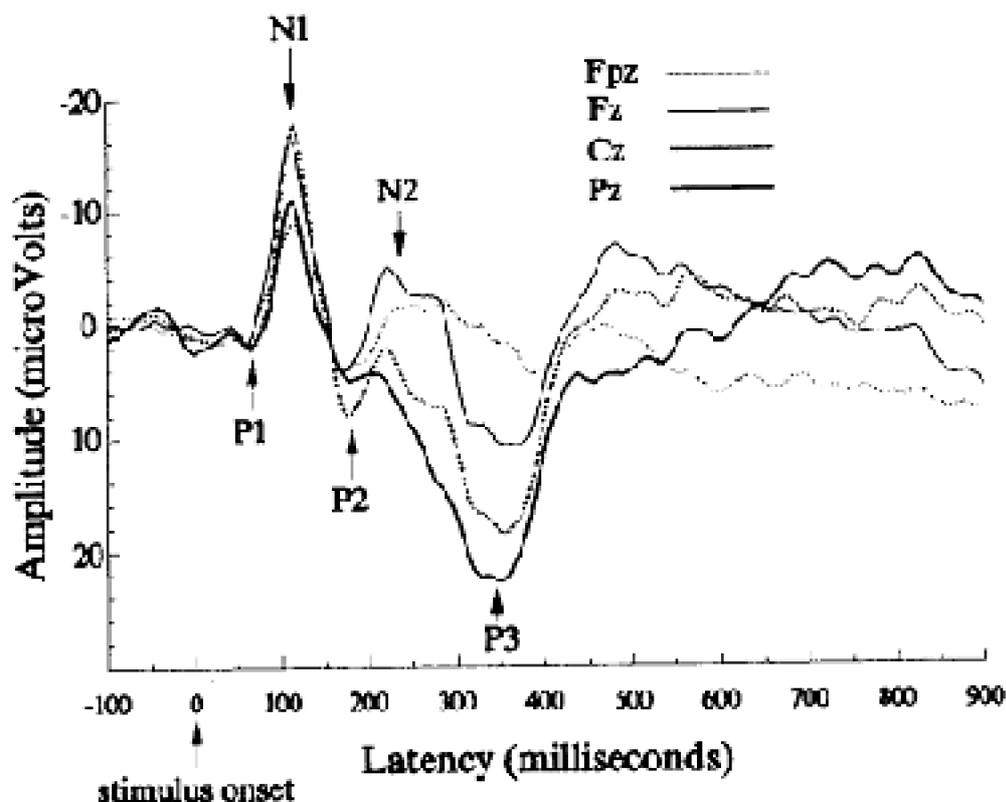


Figure 1.11 : Amplitude des différences de potentiels enregistrées, au cours du temps, à la surface du scalp. Représentation des principaux événements (P1, N1, P2, N2, P3) des PE visuels, pour 4 électrodes médianes (Fpz, Fz, Cz, Pz). Les potentiels négatifs sont orientés vers le haut (Segalowitz and Chevalier, 1998).

L'enregistrement des variations de potentiel électrique se fait au moyen de 32, 64 ou 128 électrodes (capteurs), réparties sur un bonnet selon le système conventionnel 10-20. L'équipement d'enregistrement étant constitué d'un bonnet d'électrodes, il est relativement peu coûteux et donc très répandu. La technique des Potentiels Evoqués étant utilisée dans les études que nous présenterons par la suite, nous la présenterons de manière plus détaillée dans le chapitre 3.

E.1.b. La Magnéto-encéphalographie (MEG)

Les premières mesures en MEG ont été réalisées en 1968 par Cohen. Le système évolue avec l'apparition des SQUID²⁸ en 1972, et on passe de systèmes de 7 à 37 capteurs couvrant partiellement la tête à des systèmes à casque intégral d'environ 150 capteurs, commercialisés au début des années 90. Le principe de la MEG est de mesurer les variations de champ magnétique (et non plus électrique comme en EEG) induites par une tâche donnée, à la surface du scalp. Ces variations, de l'ordre de 10^{-13} Tesla, sont

²⁸ Les SQUID sont des capteurs magnétiques supraconducteurs, refroidis à 4°K par un circuit d'hélium liquide.

enregistrées à l'aide de bobines réceptrices de flux couplées à des transformateurs de flux (SQUID). Cet appareillage est très coûteux et donc plus rare que l'EEG. Par contre, il permet d'enregistrer les réponses évoquées de manière beaucoup plus focale que l'EEG, et l'enregistrement du signal est beaucoup moins affecté par les tissus cérébraux. Cette technique est aussi beaucoup moins sensible que l'EEG aux bruits extérieurs, entre autre parce que l'appareillage est systématiquement contenu dans une cage de Faraday. L'inconvénient de cette technique par rapport à l'EEG est que les enregistrements sont sélectifs pour les sources de courant tangentielles et peu profondes, alors que l'EEG permet d'enregistrer des sources profondes, et de toute orientation. L'observation des résultats de MEG est très similaire à celle des résultats d'EEG, les pics observés étant notés 'M' suivi de la latence de l'évènement.

E.1.c. La Tomographie par Emission de Positons (TEP)

La technique de la TEP a été mise au point en 1972, puis a connu un essor dans les années 80. Cette technique est basée sur le principe fondamental que toute augmentation de l'activité neuronale est associée à une augmentation régionale du débit et du volume sanguins. Le principe de base de la TEP est de mesurer l'augmentation du débit sanguin régional, permettant ainsi d'associer une région particulière du cerveau à une tâche réalisée. Un traceur radioactif est injecté au sujet, et le rayonnement émis par ce traceur est mesuré sur des capteurs externes. Les traceurs les plus couramment utilisés sont l'eau marquée à l' ^{15}O – pour la mesure du débit sanguin –, et le deoxyglucose marqué au ^{18}F – pour la mesure du métabolisme du glucose. Cette technique de localisation des activations cérébrales est de plus en plus souvent remplacée par l'IRMf, du fait de plusieurs inconvénients majeurs : Cette méthode est invasive puisqu'elle nécessite de multiples injections de produits à rayonnement radioactif. De plus, elle ne permet pas de recueil de données de type événementiel, c'est-à-dire en rapport avec la survenue d'événements cognitifs (perception d'un stimulus par exemple), car l'acquisition des données doit s'effectuer sur une assez longue période de temps (90s par exemple).

E.1.d. L'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

La dernière grande technique d'imagerie est l'Imagerie Par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf), apparue en 1990, qui constitue aujourd'hui la méthode de prédilection pour les études de localisation, grâce à différentes spécificités : Contrairement à la TEP, cette méthode d'investigation clinique est non invasive. Sa résolution spatiale est identique à celle de la TEP, mais sa résolution temporelle, bien que toujours faible, est meilleure que celle de la TEP. Ceci permet l'utilisation de paradigmes classiques de type 'block' initialement développés en TEP, mais aussi de paradigmes 'événementiels', inexploitable en TEP en raison d'une trop mauvaise résolution temporelle. Un autre avantage de cette technique pour son utilisation en recherche est que la superposition des images anatomiques et fonctionnelles est facilement réalisable, alors que la technique de la TEP nécessite la superposition des images fonctionnelles acquises à des images anatomiques réalisées parallèlement en IRM.

La technique de l'IRMf exploite les variations du débit sanguin au travers des changements dans l'oxygénation du sang. Tout d'abord, l'oxyhémoglobine (HbO_2) –

hémoglobine chargée en oxygène pour son transport dans le sang – est une molécule diamagnétique (c'est-à-dire non magnétique), donc qui n'influe pas sur le champ magnétique extra-vasculaire. A l'inverse, la désoxyhémoglobine (Hb) est paramagnétique et s'aimante donc en présence d'un champ magnétique externe. Elle induit ainsi un champ magnétique perturbateur autour des capillaires où elle circule. Par ailleurs, lorsque des neurones passent d'un état de repos à un état d'activation, le débit sanguin augmente localement, tandis que la consommation en oxygène des neurones augmente relativement peu. Il en résulte une augmentation de la saturation capillaire et veineuse en oxygène, en aval des neurones activés, et donc une diminution de la concentration relative de désoxyhémoglobine (effet BOLD²⁹). Ceci induit une diminution de la différence de susceptibilité magnétique entre les espaces intra- et extra-vasculaires en comparaison à l'état de repos. Cette différence de susceptibilité magnétique est le paramètre biophysique auquel le signal par résonance magnétique nucléaire (RMN) est sensible (d'après (Raichle et al., 1994)). Le contraste BOLD reflète des modifications hémodynamiques locales, mais ne fournit pas de réponse sur la relation entre ces variations et l'activité neuronale. Les origines neuronales exactes de l'activation cérébrale mise en évidence par l'IRMf ne sont donc pas parfaitement déterminées.

Il existe d'autres techniques d'investigation des fonctions langagières que nous ne détaillerons pas ici, telles que l'IRM de diffusion (voir par exemple (Basser et al., 1994)), la Stimulation Magnétique Transcranienne (TMS) (voir par exemple (Rossini et al., 1994)) ou l'implantation d'électrodes intracérébrales (voir par exemple (Wilson, 2004)).

Outre la précision anatomique et temporelle apportée par ces méthodes, l'utilisation de paradigmes expérimentaux variés a permis de distinguer les différents processus intervenants dans de nombreuses et diverses activités cognitives. Nous allons présenter les connaissances actuelles sur la localisation (se référer à l'annexe 1.2 pour la localisation des aires) et la temporalité des activations cérébrales mises en place pour le traitement du langage.

E.2. Corrélats neuroanatomiques du traitement de stimuli langagiers

E.2.a. Question de la latéralisation hémisphérique

Le problème de la localisation cérébrale des fonctions langagières contient une première question majeure non encore résolue : la latéralité hémisphérique. Une caractéristique du cerveau humain, qui le différencie de tous les autres organes ainsi que du cerveau de la plupart des animaux est que les deux hémisphères diffèrent fondamentalement anatomiquement et fonctionnellement (Geschwind and Levitsky, 1968; Habib et al., 1995). La manifestation la plus directe est celle de la latéralité manuelle : environ 70% de la population possède une préférence exclusive pour la main droite, 25% sont plus ou moins ambidextres et moins de 5% sont gauchers absolus. L'importance de la latéralité – qui est prise en compte dans les critères d'inclusion lors du recrutement de sujets – vient du fait

²⁹ L'effet BOLD est la variation locale de susceptibilité magnétique par variation de concentration en désoxyhémoglobine (agent de contraste intrinsèque), qui induit une variation de l'amplitude du signal RMN.

qu'il existe une relation statistique entre manualité et latéralisation du langage : plus de 95% des droitiers absolus auraient les fonctions langagières dans les aires périsylviennes de l'hémisphère gauche, alors que 35 à 40% des ambidextres et gauchers auraient le langage à droite (Geschwind, 1970; Geschwind and Galaburda, 1985; Hecaen et al., 1981). Ceci explique le critère fondamental de recrutement – pour des expériences de neuroimagerie – de sujets uniquement droitiers, afin d'obtenir un échantillon statistiquement homogène en terme de latéralité cérébrale des fonctions langagières.

Chez les sujets droitiers ayant le langage latéralisé à gauche, l'hémisphère droit – spécialisé dans le traitement du matériel visuo-spatial – semble jouer un rôle malgré tout dans le traitement de certains paramètres du langage oral tels que la prosodie ou l'accent, dans le traitement du matériel émotionnel, et sans doute dans la capacité à gérer l'organisation discursive et textuelle. Des études sur des sujets adultes ayant des lésions acquises au sein de l'hémisphère droit ont montré que ces patients peuvent souffrir de déficits dans le traitement du langage non littéral, de l'humour, ou encore de troubles de la cohésion du discours (voir (joanette et al., 1990)). Chez les sujets droitiers, l'hémisphère gauche serait ainsi plutôt spécialisé dans les traitements de type séquentiel et analytique, tandis que l'hémisphère droit serait requis pour les traitements plus globalistes (Cornelissen et al., 2003). D'autre part, des études de patients avec lésion unilatérale ainsi que des études sur les champs visuels chez des sujets sains proposent que l'hémisphère gauche soit impliqué dans le traitement rapide et conceptuel du langage, en production et compréhension, alors que l'hémisphère droit serait plutôt lié au maintien à long terme de l'information verbale.

Si l'on admet l'idée d'une spécialisation de l'hémisphère gauche pour le traitement du langage, on peut se demander si cette spécialisation est innée ou si elle est tributaire de stimulations extérieures. Les deux hypothèses – qui ne semblent pas incompatibles – ont été avancées :

(1) Les deux hémisphères pourraient être équipotentiels à la naissance, avec une spécialisation hémisphérique relativement tardive (Lenneberg, 1967). Cette hypothèse est appuyée par des observations de prise en charge du langage par l'hémisphère droit dans des cas d'aphasie de l'enfant avec lésion hémisphérique gauche.

(2) Cette hypothèse de spécialisation tardive s'oppose à celle d'une spécialisation précoce, voire présente dès la naissance. Les observations physiologiques de Geschwind & Levitsky (Geschwind and Levitsky, 1968) montrant des différences anatomiques entre les deux hémisphères – la surface du planum temporal est beaucoup plus large à gauche qu'à droite – plaident en faveur de cette thèse.

Ainsi, les relations entre latéralisation hémisphérique et acquisition du langage sont encore mal connues. On ne sait pas si le langage est nécessaire à la latéralisation ou si celle-ci précède l'acquisition du langage.

E.2.b. Corrélats neuroanatomiques du traitement de stimuli langagiers

Traitement visuel "de bas niveau"

La première activation cérébrale, après présentation visuelle de stimuli langagiers, est observée dans les aires visuelles primaires bilatérales, appelées aussi **cortex strié** (Cornelissen et al., 2003; Petersen et al., 1988; Tarkiainen et al., 1999). Cette région serait mise en jeu pour les traitements perceptifs primaires, dits "de bas niveau", lors de toute présentation de stimuli visuels, orthographiques ou non (Petersen et al., 1990).

Traitement orthographique

(A) L'activation se propage ensuite aux aires visuelles associatives – ou **cortex visuel extra-strié** – bilatéralement ou dans l'hémisphère gauche selon les études (Cornelissen et al., 2003; Howard et al., 1992; Petersen et al., 1988; Petersen et al., 1990; Tarkiainen et al., 1999). Cette activité serait spécifique au traitement des caractères linguistiques, comparativement à celui des objets, visages, etc.

En effet, le cortex visuel extrastrié est activé lors de tâches de reconnaissance de mots ou de pseudo-mots, mais pas lors de présentations de caractères non linguistiques ou de croix de fixation (Hagoort et al., 1999; Petersen et al., 1990; Price et al., 1994; Rumsey et al., 1997a). Cette activation étant observée pour les pseudo-mots autant que pour les mots, Indefrey et al. proposent qu'elle soit associée à la longueur et à la complexité visuelle des stimuli linguistiques, plus qu'à leur statut lexical (Indefrey et al., 1997). Outre la sensibilité de cette activation au nombre de lettres de la séquence (Indefrey et al., 1997; Tyler et al., 2004), elle est aussi dépendante de l'allure de présentation (Price et al., 1996a) et du temps d'apparition dans le champ visuel (Price and Friston, 1997b; Price et al., 1996a; Price et al., 1994).

Plus spécifiquement, les aires extra-striées de l'hémisphère droit contribueraient au traitement de la forme globale des stimuli, alors que les régions homologues de l'hémisphère gauche participeraient à un traitement plus localisé des stimuli linguistiques (Cornelissen et al., 2003).

(B) Aujourd'hui, le caractère uniquement 'orthographique' des activations du cortex extra-strié est remis en cause. De plus en plus d'auteurs révèlent une sensibilité aux effets lexicaux dès le stade d'activation du cortex extra-strié (Kronbichler et al., 2004) : dans une tâche de décision lexicale en IRMf, la comparaison entre les mots et les pseudo-mots légaux³⁰ révélerait une activation plus soutenue des régions occipito-temporales bilatérales pour les mots (Fiebach et al., 2002). Les auteurs proposent que ces régions soient impliquées dans la reconnaissance pré-lexicale des formes visuelles des mots. Le réseau extra-strié, incluant le gyrus fusiforme, fournirait le code d'accès aux informations sémantique ou phonologique de plus haut niveau, représentées dans le gyrus temporal moyen postérieur gauche – également plus activé pour les mots que pour les pseudo-mots. Le **cortex extra-strié bilatéral** semble donc être impliqué dans le traitement pré-lexical des informations langagières. Cette hypothèse est soutenue par les résultats de Garrett et al. (Garrett et al., 2000) montrant, en TEP, que la capacité de sujets normo-lecteurs à distinguer des lettres et des non-lettres est corrélée

³⁰ Les pseudo-mots légaux sont des séquences de lettres prononçables et sans digraphes aberrants ('SAJIN' par exemple) alors que les pseudo-mots illégaux sont des séquences prononçables mais contenant au moins un digraphe aberrant ('CTILU' par exemple : le digraphe 'CT' n'existe, en première position, dans aucun mot de la langue française).

avec l'activité dans l'aire BA 37 gauche ; et par ceux de Pernet et al. (Pernet et al., 2005) suggérant que l'aire BA 37 gauche soit impliquée dans l'accès des formes des lettres stockées en mémoire.

Conversion graphème-phonème

Dans l'expérience de Fiebach citée précédemment, les mots de basse fréquence et les pseudo-mots provoquent des activations plus importantes que les mots de haute fréquence dans la partie supérieure du **pars opercularis** (BA 44), l'insula antérieure, le noyau caudé et le thalamus (Fiebach et al., 2002). En se basant sur les modèles double-voie (voir paragraphe C.3.c), les auteurs concluent que ces régions serviraient d'intermédiaire à l'accès lexical via la conversion graphème-phonème. D'après Binder et al. (Binder et al., 2003), les aires impliquées dans l'appariement entre orthographe et phonologie sont le cortex pré-moteur, l'aire motrice supplémentaire bilatérale, le pars opercularis et le pars triangularis gauches, le sulcus frontal inférieur droit et le gyrus frontal moyen antérieur droit. Grâce à une méta-analyse réalisée sur 35 études de neuroimagerie, Jobard et al. (Jobard et al., 2003) proposent quant à eux que la conversion graphème-phonème repose sur les aires temporales supérieures gauches, le gyrus supramarginal gauche et le pars opercularis gauche, les deux dernières régions reflétant l'augmentation de la charge en mémoire de travail.

Traitements phonémique et phonologique

(A) La seule région significativement plus activée pour la répétition de mots entendus que pour la lecture est localisée dans le **gyrus temporal supérieur gauche**. Cette aire est aussi sensible à la dénomination de sons de l'environnement (Price et al., 2003), et à l'écoute de sons vocaux (rires, éternuements etc.) *versus* sons non-vocaux (cloches, claquements de doigts etc.) (Belin et al., 2000). L'activation de cette aire pourrait refléter le traitement acoustique requis dans le traitement des sons langagiers et environnementaux *versus* traitement des bruits.

Plus précisément, une partie du gyrus temporal supérieur gauche ainsi que le bord supérieur du sulcus temporal supérieur – **gyrus de Heschl et planum temporal**, premières aires de projection corticale des voix auditives ascendantes – semblent jouer un rôle majeur dans la représentation de l'information phonémique sublexicale. En effet, ces régions sont plus activées chez des sujets ayant une bonne perception catégorielle (sujets divisant aisément un continuum phonémique en deux catégories syllabiques discrètes) (Liebenthal et al., 2005a). D'après Binder et al. (Binder et al., 2000), cette région serait spécifique au traitement de la parole, sur des bases acoustiques et non pas linguistiques. Ils observent en effet une activation des sulci temporaux supérieurs plus importante à l'écoute de parole qu'à l'écoute de sons, de manière équivalente pour des mots, des pseudo-mots ou des mots inversés.

Les **régions temporales plus ventrales** – bord inférieur du sulcus temporal supérieur et gyrus temporal médian, qui sont des aires multimodales recevant des projections visuelles, somatosensorielles et auditives (Seltzer and Pandya, 1994)) – pourraient être liées à une analyse linguistique de haut niveau des phonèmes perçus

(Binder et al., 2000; Mummery et al., 1999).

A l'inverse, une activation non spécifique aux syllabes dans des **régions temporales dorsales** révèle leur rôle dans l'analyse des traits acoustiques pré-phonémiques (Liebenthal et al., 2005b).

(B) L'analyse acoustique de stimuli linguistiques versus non linguistiques induit outre l'activation du gyrus temporal supérieur gauche, celle de l'aire de Broca (Demonet et al., 1992). Cette région est aussi activée dans des tâches de jugement de rimes en modalité auditive (Zatorre et al., 1992; Zatorre et al., 1996) ou visuelle (Paulesu et al., 1993), et dans des tâches de lecture de pseudo-mots et mots irréguliers *versus* mots réguliers (Herbster et al., 1997). L'activation de l'**aire de Broca** – considérée comme étant responsable de la production du langage – est interprétée dans ce type d'études comme reflétant l'accès à la représentation articulatoire des phonèmes, étape indispensable à la réalisation d'un décodage des sons du langage ((Mesulam, 1990); voir aussi (Demonet et al., 2005; Fiez and Petersen, 1998) pour revue).

Cette conception a été reprise par Paulesu et al. (Paulesu et al., 1993), suite à une étude réalisée en TEP sur la mémoire de travail verbale. Paulesu et al. proposaient alors que l'aire de Broca, les gyri temporaux supérieurs (incluant l'aire de Wernicke), les gyri supramarginaux et l'insula forment la boucle articulatoire (voir le modèle de Baddeley (Baddeley, 1986)). Plus précisément, l'**aire de Broca** serait impliquée dans la répétition subvocale, la **région supramarginale gauche** serait associée au stockage de l'information phonologique, et les **gyri temporaux supérieurs** seraient impliqués dans le traitement phonologique indépendant des processus mnésiques ((Paulesu et al., 1993); voir aussi (Fiez and Petersen, 1998; Gold and Buckner, 2002)).

Traitement lexical

(A) Pour ce qui est de la *modalité auditive*, l'**aire de Wernicke** serait le lieu de stockage de la 'forme auditive des mots', comme stipulé par le modèle neurologique (Giraud and Price, 2001; Howard et al., 1992; Petersen et al., 1988; Price et al., 1996c) (voir le paragraphe D.2 pour la description de ce modèle).

Certaines études montrent une activation de l'aire de Wernicke pour l'écoute de parole *versus* écoute de sons non langagiers (Binder et al., 2000; Mummery et al., 1999; Scott et al., 2000) mais pas pour la dénomination de sons vocaux (rires, éternuements etc.) ou de sons de l'environnement *versus* écoute de sons modulés ou de sons langagiers brouillés (Belin et al., 2000; Giraud and Price, 2001) : les auteurs s'accordent alors à dire que cette région serait le siège du lexique mental auditif.

Mais certaines études montrent des activations dans la même région, durant des tâches n'impliquant pas de traitement de parole. Par exemple, Celsis et al. (Celsis et al., 1999) observent une activation de l'aire de Wernicke en réponse à des sons inattendus, et Bischoff-Grethe et al. (Bischoff-Grethe et al., 2000) observent cette même aire activée en l'absence de tout *input* ou *output* langagier.

Ainsi, l'activation de l'aire de Wernicke ne correspond pas qu'aux demandes de traitement de forme auditive des mots. Il est possible que des aires fonctionnellement différentes soient très proches dans la région temporale postérieure supérieure, trop

souvent confondues sous le terme 'aire de Wernicke'. Il est possible aussi qu'une même aire sous-tende différentes fonctions, selon les aires avec lesquelles elle interagit. Par exemple, l'aire de Wernicke pourrait jouer un rôle dans le traitement de la forme auditive des mots quand elle est co-activée avec l'aire de Broca, et avoir d'autres fonctions si elle est en interaction avec d'autres aires. Des études supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir répondre à cette question (Price et al., 2003). Mais nous pouvons d'ores et déjà noter que la première hypothèse est fortement plausible. En effet, d'autres aires cérébrales (l'aire de Broca par exemple) ont déjà été subdivisées de la sorte. Les aires corticales sont de plus en plus définies comme des 'territoires' avec différentes fonctionnalités plutôt que comme des aires très restreintes, localisées et spécifiques d'une unique fonction cognitive (voir (Catani et al., 2005)). Ceci n'exclue bien sûr pas la seconde hypothèse, les deux n'étant pas incompatibles.

(B) En *modalité visuelle*, les données sont beaucoup moins concordantes. Trois propositions de localisation de l'aire de la 'forme visuelle des mots' s'opposent actuellement, sans réel consensus :

(1) Petersen et al. (Petersen et al., 1988; Petersen et al., 1990) ont observé une activation du **cortex extra-strié médian gauche** spécifique à la présentation de mots et de pseudo-mots en comparaison à la présentation d'un point, cette aire ne s'activant pas à la présentation d'une chaîne de caractères non linguistiques ou d'un non-mot. Les auteurs concluaient à l'époque que cette région jouerait un rôle crucial dans l'accès au lexique visuel.

Dans une autre étude en TEP, Howard et al. (Howard et al., 1992) ont proposé aux sujets une tâche de lecture de mots à haute voix comparée à la vision de séquences de caractères non alphabétiques, et n'ont pas observé d'activation significative du cortex extra-strié médian gauche. De plus, d'autres études ont montré que cette même région extra-striée gauche était activée par la présentation visuelle d'objets ou d'autres stimuli complexes (e.g., (Bookheimer et al., 1995; Indefrey et al., 1997; Moore and Price, 1999)).

Ainsi, l'activation extra-striée médiane gauche ne semble pas être spécifique aux *inputs* orthographiques et semble refléter un traitement visuel précoce, modulé par les demandes de la tâche (Mechelli et al., 2000).

(2) La deuxième localisation possible de l'aire de la 'forme visuelle des mots' a été proposée par Howard et al. (Howard et al., 1992). Dans leur étude présentée précédemment, les auteurs n'observaient pas d'activation "mot-spécifique" dans le cortex extra-strié gauche, mais dans la **partie postérieure du gyrus temporal moyen gauche**, qu'ils interprétaient comme étant le siège du lexique visuel. Seulement, cette région n'était pas significativement plus activée en lecture qu'en répétition de mots entendus. Il n'y a donc aucun moyen de dire que cette région est plus impliquée dans le traitement de la forme visuelle des mots que dans celui de leur forme auditive.

Afin de définir à quel point les différences méthodologiques pouvaient être à l'origine des différences observées entre les études de Petersen et Howard, Price et al. (Price et al., 1994) ont réalisé une étude en TEP pour déterminer l'impact sur les résultats des variations de temps de présentation et de type de tâche. D'après Price et al. (Price et al., 1994), en accord avec Howard et al. (Howard et al., 1992), les aires temporales

supérieures et moyennes gauches joueraient un rôle primordial dans le traitement des mots présentés en modalité visuelle. Le circuit cortical temporal gauche serait activé préférentiellement en tâche de lecture de mots, alors que les activations occipitales seraient dues à la complexité visuelle des stimuli ressemblant à des mots plutôt qu'à leurs caractéristiques lexicales (voir (Indefrey et al., 1997); paragraphe précédent sur le traitement orthographique).

Ainsi, bien que l'idée soit encore discutée aujourd'hui, l'activation du **cortex occipital** serait liée au traitement orthographique des séquences de lettres, et le **cortex temporal gauche** serait activé lors du traitement lexical de ces séquences (mais sans aucune certitude de l'existence d'une aire spécifiquement dédiée au traitement de la forme visuelle des mots).

(3) La troisième région corticale supposée sous-tendre le système de traitement de la forme visuelle des mots est le **cortex temporal inférieur postérieur gauche** (Cohen et al., 2000). Cohen et al. ont réalisé une tâche lecture de mots présentés dans les hémichamps visuels droit ou gauche (versus fixation), qui implique dans les deux cas l'activation d'une aire temporale inférieure postérieure gauche, cette même aire étant fréquemment endommagée chez des patients souffrant d'alexie sans agraphie.

Cette aire – le gyrus fusiforme médian gauche –, activée préférentiellement pour les mots *versus* non-mots (Cohen et al., 2002) a été baptisée la '**Visual Word Form Area**' (VWFA) – aire de traitement de la *forme visuelle des mots*, notion introduite par Petersen et al. en 1990 (Petersen et al., 1990). Cohen et al. (Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002) proposent que la VWFA soit une aire cérébrale spécifique de la représentation en mémoire des mots, activée pour aucun autre type de stimuli (voir aussi (McCandliss et al., 2003)). Le gyrus fusiforme gauche est en effet plus activé pour des séquences de consonnes que pour des séquences de chiffres (Polk et al., 2002) ou des formes géométriques (Tagamets et al., 2000).

Cependant, dans l'étude en TEP de Rumsey et al. (Rumsey et al., 1997a), les lectures de mots et de pseudo-mots impliquaient toutes deux l'activation bilatérale du gyrus fusiforme. Ainsi, aucune certitude n'existe aujourd'hui quant à la spécificité de cette région à la lecture de mots. Une des principales objections à cette hypothèse est que cette aire serait impliquée dans la représentation de la forme visuelle d'autres stimuli que les mots (Price and Devlin, 2003). La dénomination d'images, de lettres et de couleurs (Moore and Price, 1999; Price and Friston, 1997a) impliquerait aussi l'activation du cortex temporal inférieur postérieur gauche. De plus, il peut être activé lors de la répétition de mots entendus, autant que pendant la lecture (Price et al., 2003).

Hillis et al. ont proposé récemment une synthèse des différentes hypothèses quant au rôle de la VWFA (Hillis et al., 2005) : l'activation de la VWFA et de son homologue dans l'hémisphère droit serait impliquée dans les traitements pré-lexicaux. Son activation unilatérale, associée à celle du gyrus angulaire et du gyrus frontal inférieur, permettrait l'accès au lexique mental. Selon Pernet et al. (Pernet et al., 2005), et en accord avec Cohen et al. (Cohen et al., 2004), la VWFA pourrait être une région dédiée à la fois à la catégorisation de lettres et à la reconnaissance de séquences de lettres familières. Il resterait alors à définir si deux circuits neuronaux proches mais indépendants sont activés

dans ces deux phases de traitement, ou si un seul réseau est impliqué.

Dans l'étude de Price et al. citée précédemment (Price et al., 2003), les auteurs remettent en question l'idée même d'une région corticale spécifiquement dédiée au traitement de la forme visuelle des mots, chacune des régions potentielles – le **cortex extra-strié gauche**, cf. (Petersen et al., 1990); l'**aire temporale moyenne postérieure gauche**, cf. (Howard et al., 1992); l'**aire temporale inférieure postérieure gauche**, cf. (Cohen et al., 2000) – étant activée dans d'autres types de tâches.

Traitement sémantique

(A) Le traitement sémantique impliquerait les **aires cérébrales temporo-pariétales et frontales inférieures bilatérales**, avec une prédominance gauche (Bookheimer, 2002; Demonet et al., 1992; Fiez and Petersen, 1998; Petersen et al., 1988; Petersen et al., 1990; Price et al., 1996b; Pugh et al., 1996; Simos et al., 2000).

Plus précisément, les tâches de jugement sémantique semblent impliquer le gyrus frontal inférieur gauche (BA 47) (Booth et al., 2002; Hagoort et al., 1999), l'aire préfrontale postérieure gauche (BA 45) (Fiebach et al., 2002; Thompson-Schill et al., 1997) et frontale médiale gauche (BA 6) (Xu et al., 2002), le gyrus temporal moyen gauche (BA 21) (Booth et al., 2002) ou bilatéral (Hagoort et al., 1999; Xu et al., 2002) et temporal postérieur gauche, ainsi que les régions hippocampiques (Binder et al., 2003).

(B) Le lobe pariétal postérieur inférieur gauche, incluant le **gyrus angulaire**, est impliqué dans le traitement sémantique, en modalité visuelle ou auditive (Binder et al., 2003; Demonet et al., 1992; Demonet et al., 1994; Gorno-Tempini et al., 1998; Mummery et al., 1998).

Son rôle dans le traitement sémantique des mots lus ne faisant pas l'unanimité, le gyrus angulaire a été particulièrement étudié. Dans certains travaux, la lecture silencieuse active le gyrus angulaire (Bookheimer et al., 1995; Price et al., 1996a), particulièrement quand les mots forment des phrases (Bavelier et al., 1997; Bottini et al., 1994). D'autres études sur la lecture silencieuse utilisant des mots isolés ne montrent pas d'activation du gyrus angulaire (Beauregard et al., 1997; Brunswick et al., 1999; Herbster et al., 1997; Moore and Price, 1999; Rumsey et al., 1997a). Ainsi, cette région semble être liée à l'accès sémantique, plus marqué quand des phrases sont lues (Bavelier et al., 1997) ou quand des mots isolés sont présentés lentement (Price et al., 1996a) que quand des mots isolés sont présentés rapidement.

Cette implication du gyrus angulaire gauche est confirmée du fait de son activation dans des tâches sémantiques réalisées sur des objets (Vandenberghe et al., 1996) et des visages (Gorno-Tempini et al., 1998), et de sa sur-activation dans des tâches sémantiques *versus* phonologiques (Demonet et al., 1992).

Quel que soit son rôle fonctionnel, l'implication du gyrus angulaire gauche dans les processus de lecture est mise en évidence dans une étude de stimulation corticale directe (Roux et al., 2004) : on voit sur la figure ci-dessous (figure 1.12) que le gyrus angulaire (région grisée) est la quatrième région de l'hémisphère gauche la plus souvent impliquée dans la lecture, sur les 21 régions stimulées lors de l'étude.

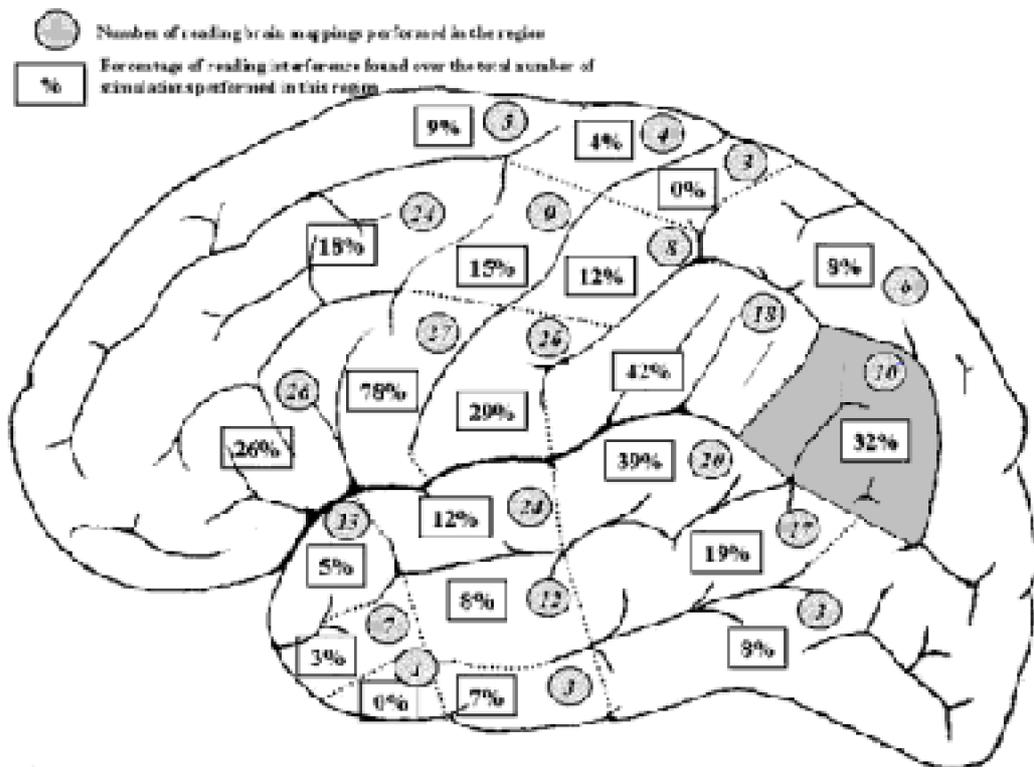


Figure 1.12 : Localisations cérébrales (hémisphère gauche) des régions stimulées (stimulation corticale directe) au cours de tâches de lecture, chez 44 patients. Le cortex est schématiquement divisé en régions délimitées par des pointillés. Cercles = nombre de fois que la région corticale a été stimulée. Carrés = pourcentages d'interférences avec la lecture qui ont été observées sur le nombre total de stimulations réalisées dans la région (d'après (Roux et al., 2004)).

(C) La **jonction temporo-pariétale postérieure gauche** et le **lobe temporal antérieur inférieur gauche** semblent aussi être impliqués dans le traitement sémantique, étant activés dans la lecture de mots *versus* pseudo-mots sans signification (Brunswick et al., 1999), dans la lecture de noms d'objets et de personnes célèbres *versus* pseudo-mots (Gorno-Tempini et al., 1998), ou encore dans des tâches de décision sémantique (vivant ou non ?) *versus* décision phonologique (deux syllabes ou non ?) sur des noms d'objets, d'animaux et de fruits (Price et al., 1997b).

Au sein du cortex temporal, il existerait des aires de différentes localisations anatomiques spécialisées dans l'accès à différents types d'attributs sémantiques (Damasio et al., 1996; Martin et al., 1995; Martin et al., 1996; Warrington and McCarthy, 1987; Warrington and McCarthy, 1994; Warrington and Shallice, 1984) :

(1) Une aire du **lobe temporal postérieur médian gauche** est plus activée pour la lecture de noms d'objets et de parties du corps que pour celle de noms de personnes célèbres (Gorno-Tempini et al., 2000). L'activation de cette aire augmente aussi quand les actions associées aux objets doivent être retrouvées (Martin et al., 1995). Quand les objets et les parties du corps sont nommés, des actions associées sont probablement

récupérées implicitement, ce qui est moins probable dans une situation dans laquelle des noms de personnes célèbres sont donnés (Farah and McClelland, 1991; Martin et al., 1996; Warrington and Shallice, 1984).

(2) Réciproquement, une aire du **cortex temporal antérieur inférieur** est plus activée pour la lecture de noms de personnes célèbres que pour celle de noms d'objets (Gorno-Tempini et al., 1998), et pour la vision de visages célèbres que pour celle d'objets courants (Gorno-Tempini et al., 2000; Gorno-Tempini et al., 1998). Elle est aussi plus activée pour la lecture de phrases grammaticales que quand l'ordre des mêmes mots est mélangé (Vandenberghe et al., 2002), pour la lecture de phrases que pour celle de mots isolés (Bottini et al., 1994; Mazoyer et al., 1993), ou pour la lecture d'histoires *versus* lecture de phrases sans relation (Fletcher et al., 1995). L'activation dans le lobe temporal antérieur inférieur augmenterait quand les attributs sémantiques deviennent plus spécifiques. Par exemple, les personnes célèbres sont associées à des mémoires biographiques très spécifiques et les phrases requièrent l'intégration de nombreux attributs sémantiques en concepts plus spécifiques.

(D) L'**aire fusiforme médiane** (BA 20) près du sulcus collatéral (qui sépare les gyri fusiforme et parahippocampique), est communément activée par la vision de mots ou d'images (Bookheimer et al., 1995; Damasio et al., 1996; Herber et al., 1997; Martin et al., 1996; Moore and Price, 1999). Cette aire est aussi plus active quand les gens écoutent des noms d'objets et imaginent le stimulus *versus* quand des mots abstraits sont entendus passivement (D'Esposito et al., 1997). D'Esposito et al. (D'Esposito et al., 1997) ont associé cette région aux attributs visuels de la mémoire sémantique mais sans être spécifique à la mémoire visuelle puisque la même aire est activée quand des sujets aveugles de naissance lisent des mots abstraits en Braille, soit en utilisant un *input* tactile (Buchel et al., 1998; Moore and Price, 1999).

(E) Nous venons de voir que l'**aire de Broca** est impliquée dans le traitement de l'information sémantique, alors que nous l'avions précédemment décrite comme impliquée dans le traitement de l'information phonologique. Le gyrus frontal inférieur gauche semble donc être une région impliquée dans la formation et la récupération des encodages phonologique et sémantique (Fiebach et al., 2002; Fiez et al., 1999).

Il semble que cette région puisse être décomposée en sous zones distinctes, pour le traitement phonologique d'une part, pour le traitement sémantique d'autre part :

(1) Le **gyrus frontal inférieur postérieur gauche** – cortex prémoteur ; BA 6/44 ; *pars opercularis* – associé au cortex pariétal inférieur – gyrus supramarginal ; BA 40 – et au précunéus bilatéral – BA 7 – serait activé lors des traitements phonologiques.

(2) Les **aires antérieures du cortex préfrontal ventral** (BA 45/47) **et dorsal** (BA 44/45), associées au gyrus temporal postérieur inférieur moyen gauche – BA 21/37 – et au lobe pariétal gauche postérieur inférieur – gyrus angulaire ; BA 39 – seraient plus spécifiquement impliquées dans les processus sémantiques (Dapretto and Bookheimer, 1999; Devlin et al., 2003; Gabrieli et al., 1998; Gold and Buckner, 2002; McDermott et al., 2003; Poldrack et al., 1999).

Il est important de signaler aussi que certains auteurs proposent que le gyrus frontal inférieur gauche ait un rôle plus général d'inhibition des attributs du stimulus non

pertinents pour la tâche réalisée (Barde and Thompson-Schill, 2002; Gold and Buckner, 2002; Thompson-Schill et al., 1997).

Traitement morphologique

Certaines théories stipulent que la structure morphologique d'un mot complexe affecte sa reconnaissance, indépendamment de sa forme et de son sens. Le traitement d'items linguistiques morphologiquement complexes entraînerait une sur-activation du **gyrus frontal inférieur gauche** (Tyler et al., 2004).

Inversement, Devlin et al. (Devlin et al., 2004) obtiennent dans leur étude en IRMf des superpositions d'activations entre les régions sensibles à la structure morphologique des items et celles sensibles aux effets orthographiques et sémantiques. Ils proposent donc que la morphologie émerge de la convergence de la forme et du sens d'un mot, et ne soit pas traitée dans une région cérébrale particulière.

Traitement syntaxique

Le traitement syntaxique serait sous-tendu par le gyrus temporal supérieur gauche et le gyrus frontal inférieur gauche. De même que pour phonologie et sémantique, il semble y avoir une dissociation au niveau de ces aires :

(1) Le **gyrus temporal supérieur médian et postérieur** serait sur-activé lorsqu'il y a violation syntaxique, alors que sa **partie antérieure** serait impliquée dans des cas de complexité syntaxique (augmentation des demandes en traitement syntaxique).

(2) De la même manière, une violation syntaxique impliquerait une activation de l'**operculum frontal et du cortex prémoteur ventral** (BA 6) alors que la complexité syntaxique activerait l'**aire de Broca** (BA 44) (Dapretto and Bookheimer, 1999; Friederici et al., 2003).

Si l'on fait un rapprochement avec les études réalisées sur le primate, Fitch et al. (Fitch and Hauser, 2004) ont montré que des singes pouvaient apprendre des règles de grammaire simples (règles sous-tendues chez l'humain par l'aire BA 6) mais ne pouvaient apprendre des règles de grammaire complexes (règles nécessitant, chez l'humain, l'activation de BA 44). D'un point de vue évolutif, il est intéressant de faire le parallèle entre ces résultats, et le fait que phylogénétiquement, BA 6 est antérieure à BA 44.

Par ailleurs, Musso et al. (Musso et al., 2003) ont montré, chez l'humain, que l'aire de Broca joue un rôle déterminant dans l'acquisition de nouvelles règles grammaticales, uniquement si ces règles sont conformes à la grammaire universelle (Chomsky, 1957) (voir aussi paragraphe B. Introduction à la linguistique), et indépendamment de la famille linguistique de la langue considérée (pour Italien et Japonais).

Contrôle cognitif

Nous avons vu que l'aire de Broca est activée dans le traitement sémantique, phonologique et syntaxique du langage (Bookheimer, 2002). L'idée est aujourd'hui avancée que l'**aire de Broca** serait plutôt impliquée dans la sélection d'information parmi

différentes alternatives (Thompson-Schill et al., 1997). Son rôle serait donc plus de l'ordre du contrôle cognitif que d'une ou plusieurs fonctions linguistiques précises.

Programmation et exécution motrice

Outre les traitements orthographiques, phonologiques et sémantiques induits par la reconnaissance visuelle et auditive de mots, la lecture à haute voix et la répétition de mots impliquent un acte moteur. Ainsi, au cours de ce type de tâches actives, différentes aires cérébrales sont activées, mettant en place la programmation et l'exécution pour la production de parole.

Les processus moteurs de la production linguistique semblent être sous-tendus principalement par le **cortex moteur primaire** (BA 4), le **cortex pré-moteur latéral et médial** (BA 6) et le **cervelet médian** de l'hémisphère **gauche** (Fiez, 1997; Fiez and Petersen, 1998; Hagoort et al., 1999).

L'étude de Price et al. (Price et al., 1996c), contrastant la répétition de mots entendus à l'écoute passive de ces mêmes mots, révèle des activations dans les **cortex sensorimoteurs bilatéraux**, associées à l'*output* vers les muscles laryngé, lingual et facial, mais aussi probablement au contrôle volontaire de la respiration, composante nécessaire à l'articulation (Ramsay et al., 1993).

L'**aire motrice supplémentaire** (SMA, BA 6) et le **gyrus cingulaire** (BA 29/33), activés aussi dans cette étude, sont associés à l'initiation de la parole, puisque des lésions dans ces régions provoquent une aphasie motrice transcorticale³¹ (Damasio and Geschwind, 1984; Mesulam, 1990).

Enfin, l'**insula antérieur** est aussi impliqué dans la répétition et la lecture, cette aire étant associée à la planification de l'articulation (Wise et al., 1999).

Hormis l'acte moteur en lui-même, la répétition de mots entendus et la lecture à voix haute impliquent l'entente de sa propre voix par le locuteur. Ainsi, les cortex auditifs primaires (BA 41/42) sont activés pendant les tâches de lecture – bien que la stimulation soit visuelle – du fait que les sujets entendent les sons de leur propre voix (Price et al., 1996a).

De plus, le contrôle du *feed-back* verbal lors de la production de langage est très important pour le locuteur. Ce 'retour' auditif lui permet de contrôler en temps réel sa production langagière. Ce contrôle de la production de parole semble être sous-tendu par les gyri temporaux supérieurs bilatéraux (BA 22/42) (Hagoort et al., 1999; Indefrey and Levelt, 2004; Price et al., 1996c). En effet, des distorsions du retour verbal induisent une augmentation de l'activité des aires temporales supérieures (Hashimoto and Sakai, 2003; Hirano et al., 1997; McGuire et al., 1996).

Autres fonctions cognitives

Nous avons passé en revue les fonctions dévolues au langage et leurs (probables) localisations, majoritairement dans la région périsylvienne gauche. Nous allons

³¹ Une aphasie motrice transcorticale est une perte de la production spontanée de la parole, sans perte de la capacité à répéter.

maintenant rapidement décrire les autres aires cérébrales et leurs fonctions associées, bien que de nombreuses zones d'ombre demeurent encore aujourd'hui.

Dans le lobe frontal, les aires motrices et prémotrices (BA 4/6) abritent certains aspects du contrôle des actes moteurs, langagiers ou non (initiation, programmation, régulation). Plus en avant, le cortex pré-frontal ou dorso-latéral intervient dans des fonctions cognitives plus complexes ou fonctions exécutives (impliquant à des titres divers des processus d'attention, de mémoire, de planification et de raisonnement). L'insula, le gyrus cingulaire et le cortex orbito-frontal – expansions corticales du système limbique des émotions, appelées aires paralimbiques – serviraient à intégrer les états émotionnels dans les comportements moteurs. En arrière de la scissure de Rolando, dans la partie antérieure du lobe pariétal, se trouvent les aires de la sensibilité somatique. En arrière, le lobule pariétal postérieur est spécialisé dans certains aspects de l'intégration sensori-motrice et visuo-motrice. Le lobule pariétal inférieur gauche est une des régions spécialisées dans le langage, avec le gyrus supramarginal essentiellement dédié à la réalisation phonologique et le gyrus angulaire spécialisé dans le traitement du langage écrit. Les régions pariétales homologues droites seraient plutôt dévolues aux processus de traitement de l'espace, au contrôle de l'attention visuo-spatiale entre autres.

Nous avons vu, en particulier pour les fonctions langagières, que les études d'imagerie sont souvent à but localisationniste. Il reste tout de même deux grandes fonctions cognitives pour lesquelles il est admis que plusieurs zones interviennent, sous la forme de réseaux nerveux distribués entre surface et profondeur des deux hémisphères (Mesulam, 1990) : l'attention et la mémoire.

Effets attentionnels et mnésiques liés au traitement du langage

(A) Comme toute activité cognitive, la lecture est dépendante des processus attentionnels, sous-tendus par les **gyri cingulaires** (Howard et al., 1992; Petersen et al., 1988; Posner et al., 1988), le **thalamus** (Hagoort et al., 1999), et le **lobule pariétal postérieur** – souvent associé aux processus attentionnels de nature visuo-spatiale (Behrmann et al., 2004; Corbetta et al., 1998; Simon et al., 2002).

Une asymétrie entre les fonctions des lobes pariétaux droit et gauche a été décrite :

(1) Une activation préférentielle du **lobe pariétal droit** a été observée dans des cas d'implication d'une forte vigilance (Paus et al., 1997), de traitements globaux, ou d'attention visuo-spatiale pour une orientation globale dans l'espace (Corbetta et al., 1993).

(2) L'activation du **lobe pariétal gauche** semble être plus impliquée dans les traitements locaux – détection de traits fins par exemple (Driver et al., 1992) –, dans l'attention dirigée précisément dans l'espace, ainsi que pour les processus d'attention temporelle (Coull and Nobre, 1998).

Dans une expérience d'amorçage orthographique, sémantique ou morphologique, Devlin et al. (Devlin et al., 2004) observent une activation du **gyrus angulaire postérieur bilatéral** dans les trois types de conditions. Les auteurs en déduisent qu'une activation dans cette région reflète une réduction de charge attentionnelle liée à l'amorçage, plutôt

qu'un traitement linguistique spécifique.

(B) La mémoire est aussi impliquée dans de multiples activités cognitives, dont le langage, puisque les différentes tâches d'identification et de production langagières ne sont possibles que grâce au système mnésique. Les principales structures cérébrales liées à l'apprentissage sont les circuits sous-corticaux comprenant l'**hippocampe et le noyau amygdalien**, dans la profondeur des lobes temporaux (Squire et al., 2004).

D'autre part, la mémoire est couramment sub-divisée en mémoire épisodique (souvenirs) et mémoire sémantique (connaissances) (Tulving, 1995).

(1) L'encodage de la mémoire épisodique serait sous-tendu par les régions pré-frontales gauches, alors que son évocation activerait plutôt les régions pré-frontales droites.

(2) La mémoire sémantique semble être sous-tendue par les structures corticales impliquées dans les divers mécanismes cognitifs afférents à ces connaissances (Tulving et al., 1994).

Pour ce qui est de la mémoire de travail, elle est habituellement sub-divisée en trois 'centres fonctionnels' (Baddeley, 2003) : (1) L'*administrateur central*, qui fournit les ressources attentionnelles nécessaires à la tâche, impliquerait l'activation du **cortex pré-frontal latéral** (Paulesu et al., 1993). (2) La *boucle articulatoire*, permettant le maintien des informations dans le stock phonologique et la prononciation à voix basse, activerait l'**aire de Broca**. (3) Enfin, le *stock phonologique* serait localisé au niveau du **gyrus supramarginal gauche** (Gold and Buckner, 2002; Paulesu et al., 1993) (voir dans ce chapitre le 'Traitement phonologique').

E.3. Comparaison des données d'imagerie aux modèles

Grâce à l'avancée des techniques de neuroimagerie, le modèle traditionnel du langage Broca-Wernicke (voir paragraphe D.2) est aujourd'hui nettement amélioré. Bien que ces deux régions de l'hémisphère gauche – prédominant dans le traitement du langage – jouent un rôle critique dans la perception et la production du langage, de nombreuses autres régions des deux hémisphères interviennent dans les mécanismes linguistiques (Bookheimer, 2002; Hickok and Poeppel, 2004; Lieberman, 2002). De plus, les fonctions des aires de Broca et de Wernicke sont aujourd'hui connues de manière beaucoup plus fine que lors de leur première description : la partie postérieure supérieure de l'aire de Broca serait impliquée dans le traitement phonologique des mots, la partie antérieure ventrale dans l'encodage du sens des mots, et la région intermédiaire dans l'encodage de la structure phrastique (Bookheimer, 2002). L'aire de Wernicke semble être divisible en sous-systèmes respectivement responsables de l'identification des sons de la parole, de la production de parole et de la récupération de mots en mémoire (Wise et al., 2001). En fonction des besoins de la tâche linguistique à réaliser, ces sous-systèmes interagiraient entre eux mais aussi avec d'autres structures corticales et sous-corticales (Bookheimer, 2002; Lieberman, 2002).

Même si les données de neuroimagerie sont encore incomplètes, il est intéressant à ce stade de connaissances de tenter de définir un modèle complet du traitement

langagier, tenant compte des connaissances neuropsychologiques et psycholinguistiques, mais aussi des contraintes biologiques et résultats de localisation obtenus en imagerie.

E.3.a. Traitement du langage : combinaison des données d'imagerie fonctionnelle, des études neuropsychologiques et des modèles cognitifs

Le modèle de traitement du langage présenté figure 1.13 (voir (Price, 2000)) est basé sur le modèle neurologique du XIX^e siècle, complété et corrigé grâce aux apports de la neuropsycholinguistique et de la neurolinguistique.

Le traitement auditif des mots entendus active les gyri temporaux supérieurs bilatéraux. L'accès au sens des mots active les cortex temporal postérieur médian gauche, temporopariétal postérieur et temporal antérieur inférieur (ces différentes régions peuvent être impliquées dans différents types de procédures sémantiques).

Quand une expression orale est requise, une activation se produit dans les sulci temporaux postérieurs supérieurs et dans le cortex temporal postérieur inférieur gauche.

Les sulci temporaux postérieurs supérieurs (aire de Wernicke) pourraient sous-tendre l'expression orale non sémantique. A l'inverse, le cortex temporal postérieur inférieur gauche, qui est très proche de l'aire sémantique fusiforme médiane, serait impliqué dans l'expression orale avec utilisation du lexique et de la sémantique.

Quelles que soient les aires temporales sous-tendant l'expression orale, la planification articulatoire active l'insula antérieur gauche ou bien une région adjacente dans l'opercule frontal. La procédure de récupération phonologique implique l'intégration de l'activité de l'insula antérieur/opercule frontal avec celle des sulci temporaux postérieurs supérieurs ou du cortex temporal postérieur inférieur gauche. Enfin, le contrôle moteur de l'expression orale active les cortex sensori-moteurs bilatéraux, et l'entente des sons de la réponse orale augmente l'activation dans les gyri temporaux supérieurs.

Pour les mots écrits, le même ensemble de régions est activé. Les seules aires activées par le traitement de la lecture et pas par celui des mots entendus sont le gyrus fusiforme postérieur et le gyrus lingual. Ces aires ne sont pas spécifiques de la lecture puisqu'elles sont aussi activées dans des tâches de dénomination d'images.

Ce qui est spécifique à la lecture est la cooccurrence d'activation dans le cortex visuel et dans les sulci temporaux postérieurs supérieurs.

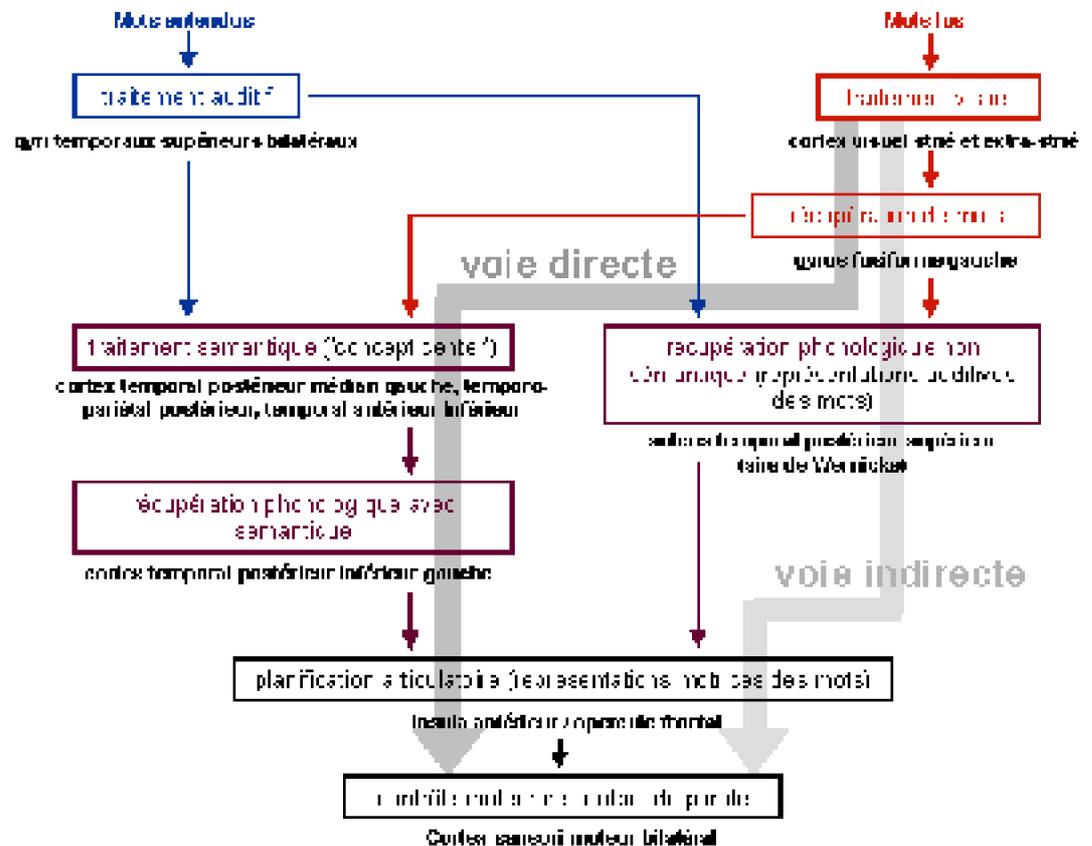


Figure 1.13 : Schéma de synthèse : Voies de traitement de mots isolés lus ou entendus

Ce modèle apporte donc un certain nombre d'informations complémentaires au modèle neurologique du XIX^e siècle : (1) le site correspondant à la fonction de l'aire de Wernicke est le bord supérieur du sulcus temporal postérieur supérieur. (2) Le site critique pour la planification de l'articulation est l'insula antérieure et non la troisième circonvolution frontale (aire de Broca). (3) Le gyrus angulaire n'est pas spécifique de la forme visuelle des mots, mais est engagé dans les processus d'associations sémantiques. (4) Le sens des mots est aussi distribué le long des cortex temporaux inférieur gauche et médian. (5) Les tâches de lecture et de récupération de noms activent le lobe temporal postérieur inférieur gauche. En accord avec les composantes cognitives du modèle du XIX^e siècle, l'activation dans les sulci temporaux postérieurs supérieurs correspond aux "représentations auditives des mots", l'activation dans l'insula antérieure gauche/opercule frontal correspond aux "représentations motrices des mots" et l'activation dans les régions extrasylviennes temporopariétales correspond au "concept center". Le désaccord tient dans les composantes de la lecture. Il n'existe pas de données d'imagerie

fonctionnelle permettant de définir avec certitude une région anatomique correspondant aux "représentations visuelles des mots" (voir paragraphe sur le 'Traitement lexical'). La fonction de la 'visual word form area' pourrait ne pas être localisée dans une aire corticale spécifique, mais émerger de l'interaction entre des traitements visuels, phonologiques et sémantiques. En terme de modélisation, la boîte de "représentation visuelle des mots" du modèle neurologique serait remplacée par une boîte de "traitement visuel" et une autre de "récupération de mots", avec une connexion ultérieure aux boîtes de "représentation auditive des mots", "concept center" et "représentation motrice des mots".

La correspondance entre les données d'imagerie fonctionnelle et les composantes cognitives du modèle de Coltheart est plus spéculative (voir figure 1.2, paragraphe C.3.c). D'après le modèle de lecture double-voie (Coltheart et al., 1993), la conversion graphèmes/phonèmes des pseudo-mots est réalisée grâce à la voie phonologique sub-lexicale alors que la lecture des mots se fait grâce à la voie lexicale visuelle, induisant une représentation phonologique directe du mot. La principale critique faite au modèle neurologique du XIX^e siècle est qu'il ne peut expliquer ces deux voies de lecture et la double dissociation des troubles dyslexiques. L'absence du cortex temporal postérieur inférieur gauche du modèle peut expliquer cette lacune. Cette absence est due au fait que les lésions touchant sélectivement le cortex temporal postérieur inférieur gauche sont rares puisque l'apport en sang dans cette région provient à la fois des artères cérébrales postérieure et médiane, ce qui protège cette région des dommages ischémiques profonds. Quand le cortex temporal postérieur inférieur gauche est inclus dans le modèle neurologique, deux routes de lecture sont alors possibles : l'une relie l'*input* visuel à l'opercule frontal via l'aire de Wernicke, et l'autre via le lobe temporal inférieur gauche. Cette suggestion coïncide avec la dissociation des sites de lésions reportée pour les dyslexies de surface et phonologique : la dyslexie de surface est associée à des lésions temporales inférieures gauches (Vanier and Caplan, 1985) et la dyslexie phonologique est associée à des lésions plus supérieures comprenant le gyrus supramarginal (Marin, 1980). La fonction du cortex temporal inférieur gauche est ainsi associée à la voie directe de lecture, celle du cortex temporal postérieur supérieur gauche, à la voie indirecte. Par contre, il n'existe pas de données de neuroimagerie suffisamment claires pour définir des sites anatomiques exacts pour les lexiques orthographique et phonologique.

Le rapprochement des données de neurolinguistique peut se faire aussi avec les modèles connexionnistes, comprenant trois blocs essentiels pour le traitement des mots : sémantique, orthographique et phonologique. La principale critique qui peut être faite à ce type de modèles est qu'ils ne sont pas contraints par les faits physiologiques et ont une faible validité biologique. Par exemple, les données physiologiques reportées dans ce chapitre indiquent qu'il existe plus d'un système anatomique impliqués dans la récupération phonologique ou sémantique des mots, et qu'il n'existe pas d'aire spécifique à l'*input* orthographique.

E.3.b. Conclusion

Les nombreux résultats de localisation des activités cérébrales liées au langage montrent d'importantes lacunes. Pour chaque aire cérébrale et chaque fonction linguistique, de nombreuses études ont été menées ces trente dernières années, sans qu'aucun

consensus n'ait été trouvé : à plusieurs aires correspondent une même fonction et inversement, une même aire se voit attribuer des fonctions diverses. Au vu de ces nombreuses divergences, il semble plus approprié de raisonner en terme de réseaux d'activations plutôt qu'en localisations précises. Par exemple, Cappa stipule l'existence de deux grandes aires corticales du langage. Une aire 'périsylvienne' – comprenant l'aire de Broca, l'aire de Wernicke, le gyrus supra-marginal et les faisceaux de substance blanche les reliant – prendrait en charge les aspects phonétiques, phonémiques et syntaxiques du langage. Par ailleurs, une vaste aire "marginale", située en périphérie de la première, comprenant les régions préfrontales et le carrefour temporo-pariéto-occipital dont le gyrus angulaire, assurerait respectivement les aspects intentionnels du discours et les aspects lexico-sémantiques (Cappa et al., 1981). Comme le résume Mesulam (Mesulam, 1990), *"each behavior is represented in multiple sites and each site subserves multiple behaviors, leading to a distributed and interactive system with a one to many and many to one mapping of anatomical substrate onto neural computation and computation onto behaviour"*.

E.4. Résultats complémentaires : études de tractographie

En 1985, une modification de l'Imagerie par Résonance Magnétique conventionnelle a permis de quantifier les caractéristiques de diffusion des molécules d'eau, in vivo (Le Bihan and Breton, 1985). A l'intérieur de la matière blanche, les molécules d'eau diffusent plus facilement le long des fibres myélinisées qu'à travers elles (Moseley et al., 1990). Cette dépendance directionnelle de diffusion est appelée anisotropie. En couplant les données d'anisotropie avec celles de dépendance directionnelle de diffusion de l'eau, il est possible d'estimer l'orientation tridimensionnelle des fibres de matière blanche dans le cerveau d'un être humain vivant, de manière non invasive. Cette découverte méthodologique a mené à la technique récente de tractographie en imagerie par résonance magnétique avec diffusion de tenseur 'in vivo' (DT-IRM) (Basser et al., 1994). Cette technique a déjà permis d'étudier la neuroanatomie des fibres de matière blanche dans différentes régions du cerveau (voir entre autres (Catani et al., 2003; Jones et al., 1999; Poupon et al., 2000)). Dans une récente étude en DT-IRM, Catani et al. ont étudié l'anatomie du faisceau arqué et la connectivité des aires périsylviennes du langage (Catani et al., 2005). Au-delà de la classique connexion directe – long segment – entre les aires de Broca et Wernicke par le faisceau arqué (cf. paragraphe D.2), Catani et al. ont mis en évidence une voie indirecte passant par le cortex pariétal inférieur (Catani et al., 2005) (voir la figure 1.14). Cette voie indirecte est parallèle et latérale au faisceau arqué classique et est composée d'un segment antérieur reliant le territoire de Broca au lobe pariétal inférieur et un segment postérieur reliant le lobe pariétal inférieur au territoire de Wernicke. La région particulière du lobe pariétal inférieur, carrefour entre les régions de Broca et Wernicke, est appelée région de Geschwind. Ces résultats vont dans le sens du modèle proposé par Lichtheim en 1885 (Lichtheim, 1885), supportant l'idée de deux voies, directe et indirecte, des aires de Broca à Wernicke.

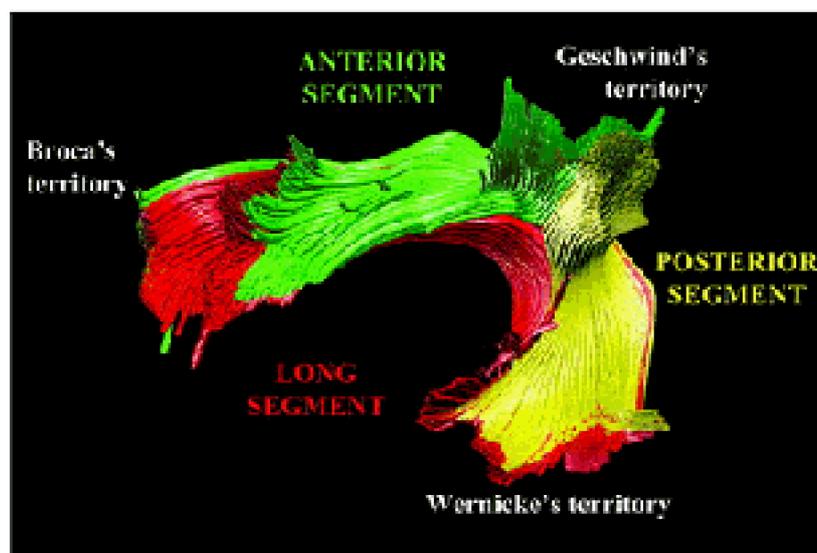


Figure 1.14 : Résultats de tractographie montrant la liaison directe des territoires de Wernicke à Broca (long segment) et la liaison indirecte, passant par le territoire de Geschwind (segments antérieur et postérieur) (tiré de (Catani et al., 2005))

Le modèle de XIX^e siècle, de type associationniste, stipulait que les informations linguistiques soient traitées dans des régions corticales localisées, avec passage sériel d'information d'une région à une autre par des fibres de matière blanche. Les alternatives de type connexionniste proposent que les traitements se fassent de manière parallèle et distribuée, dans différents groupes de neurones interconnectés plutôt que dans des centres. Bien que ces seules données de tractographie ne puissent trancher entre les deux types de modèles, elles sont tout de même fortement en faveur des modèles connexionnistes : les résultats sont incompatibles avec une idée de centres de traitements localisés, Catani (Catani et al., 2005) proposant plutôt une conception de territoires du langage, relativement étendus. L'autre donnée allant à l'encontre du modèle associationniste est que les faisceaux de fibres sont très larges, ce qui semble incompatible avec l'idée d'un simple transfert sériel d'information. Leur taille suggère plutôt que des sous-régions de ces faisceaux connectent différents territoires linguistiques en parallèle. L'idée émergeant de ces résultats est plutôt celle de connexions multiples et parallèles entre certaines régions linguistiques spécialisées des territoires de Broca, Wernicke et Geschwind, ce qui est en accord avec le modèle de langage de Mesulam (Catani et al., 2005; Mesulam, 1990). Ces résultats sont aussi parfaitement en accord avec les données de neuropsycholinguistique, puisque les aphasies de conduction peuvent être expliquées par une rupture du long segment, les aphasies motrice transcorticales par une rupture du segment antérieur, et les aphasies sensorielles transcorticales par celle du segment postérieur (Catani et al., 2005).

E.5. Localisation des troubles dyslexiques

E.5.a. Troubles du langage

La première application de la TEP à l'étude de la dyslexie fut réalisée en 1991 par K. Gross-Glenn et ses collaborateurs (Gross-Glenn et al., 1991). Ils notèrent une activation plus importante des régions occipitales internes (gyrus lingual) chez les sujets dyslexiques par rapport à un groupe contrôle. Lors de tâches phonologiques (sur entrée auditive), les dyslexiques semblent activer de façon moindre par rapport aux témoins les régions temporelle postérieure et pariétale inférieure gauches. Lors de traitements syntaxiques, il n'y a pas de différence nette par rapport aux témoins, hormis une tendance à la diminution du débit à la jonction temporo-pariétale gauche (Gross-Glenn et al., 1991; Rumsey et al., 1992; Rumsey et al., 1994). Paulesu et al. montrent ensuite, en 1996, que dans les tâches de rimes et de mémorisation, les dyslexiques activent une zone bien plus étroite de cortex, restreinte à la partie antérieure des aires du langage (aire de Broca) pour la tâche de rimes, et à sa partie postérieure (cortex pariétal inférieur) pour la tâche de mémorisation. En outre, dans les deux cas les dyslexiques n'activent pas la région de cortex située entre ces deux zones, c'est à dire le cortex insulaire (Paulesu et al., 1996). Les auteurs interprétèrent alors la dyslexie comme une **déconnection entre les zones antérieure et postérieure des aires du langage**. Cette hypothèse de déconnection fut confirmée par une étude de Horwitz (Horwitz et al., 1998) montrant un déficit, chez les dyslexiques, de co-activation de certaines aires, le gyrus angulaire entre autre. De plus, le gyrus supra-marginal gauche (BA 40, siège de la mémoire phonologique) (Demonet et al., 1992; Demonet et al., 1994; Paulesu et al., 1993) semble avoir un fonctionnement déficitaire chez les dyslexiques. Ainsi, les études de reconnaissance de lettres et de mots en neuroimagerie sur des sujets dyslexiques ont révélé des déficits d'activation de la région temporo-pariétale gauche (Temple et al., 2003; Temple et al., 2001) et des régions occipito-temporales (Shaywitz et al., 2002), incluant le gyrus supramarginal, le gyrus angulaire, le gyrus temporal supérieur (aire de Wernicke) et le cortex strié, ces aires étant impliquées dans le traitement de l'information phonologique. Des études anatomiques confirment ces observations, grâce à des mesures du volume de matière grise (Brambati et al., 2004) et de la structure de la matière blanche (Klingberg et al., 2000). Shaywitz & Shaywitz proposent aujourd'hui que la "signature" de la dyslexie soit une **désorganisation de deux systèmes cérébraux** de l'hémisphère gauche postérieur – l'un pariéto-temporal et l'autre occipito-temporal – couplée à un **engagement compensatoire** du gyrus frontal inférieur et de la région occipito-temporale postérieure droite (Shaywitz and Shaywitz, 2005). De récentes études en IRMf ont montré que la sous-activation de ces aires pouvait être compensée après rééducation (Aylward et al., 2003; Shaywitz et al., 2004; Temple et al., 2003).

E.5.b. Troubles spécifiques de la lecture

Dans une étude de 1997, Rumsey et al. ont montré une réduction d'activation et une déactivation inhabituelle dans les **aires temporelle postérieure et pariétale inférieure gauches** chez des sujets dyslexiques, dans un paradigme de lecture à voix haute de pseudo-mots et mots irréguliers (Rumsey et al., 1997b). D'autre part, la même équipe a montré que la seule région corrélée aux capacités de lecture était le **gyrus angulaire** – la

corrélation étant positive chez les sujets contrôles, négative chez les sujets dyslexiques (Rumsey et al., 1999). Le gyrus angulaire semble donc être un site important, nécessaire à la lecture, et dysfonctionnant chez les dyslexiques.

Shaywitz et al. ont montré quant à eux, au cours de tâches langagières en modalité visuelle, une hypoactivation des aires postérieures du langage (BA 21/37/39/40) chez les dyslexiques, qu'ils interprètent comme un déficit dans le traitement phonologique (Shaywitz et al., 1998).

D'une manière générale, les déficits de lecture des dyslexiques semblent être associés à des dysfonctions des régions temporo-pariétales gauches, impliquées dans la conversion graphème-phonème (Aylward et al., 2003; Horwitz et al., 1998; Shaywitz et al., 1998; Temple et al., 2003).

Dans une tâche de lecture de mots et pseudo-mots réalisée en MEG, Salmelin et al. observaient un déficit d'activation de la **région temporo-occipitale inférieure gauche** 180 ms après présentation de mots, chez les sujets dyslexiques et chez aucun sujet contrôle (Salmelin et al., 1996). Ce déficit d'activation temporo-occipitale était interprété par les auteurs comme une incapacité à traiter la forme globale des mots à un niveau pré-lexical, ou à extraire l'information phonologique immédiate.

De manière générale, le cortex occipito-temporal inférieur gauche est significativement moins activé chez les sujets dyslexiques que chez les sujets normo-lecteurs, en lecture de mots (Brunswick et al., 1999; Salmelin et al., 1996) ou de pseudo-mots (Horwitz et al., 1998; Rumsey et al., 1997b). Paulesu et al. (Paulesu et al., 2001) ont démontré la robustesse de cet effet dans trois langues européennes différentes (français, italien, anglais), mais Siok et al. (Siok et al., 2004) ont montré des résultats différents pour la lecture d'idéogrammes chinois : les sujets dyslexiques chinois souffrent d'un défaut d'activation principalement dans le gyrus frontal médian gauche, ce qui suggère que le déficit dyslexique n'est pas universel mais plutôt culturel (voir (Siok et al., 2004)). Simos et al. (Simos et al., 2002) ont observé une augmentation d'activation dans le cortex occipito-temporal inférieur gauche – ainsi que dans d'autres régions de l'hémisphère gauche – chez des enfants dyslexiques suivant un programme de rééducation.

La dyslexie pourrait correspondre aussi à un déficit ou un retard d'activation dans le "Visual Word Form System", pouvant être compensé par des voies alternatives de traitement, situées dans le cortex associatif postérieur droit (Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002; Nobre et al., 1994; Salmelin et al., 1996; Warrington and Shallice, 1980). Ces observations sur la dyslexie renforcent l'idée d'un rôle majeur du cortex extra-strié gauche dans la lecture (voir (Eden and Zeffiro, 1998) pour une revue), bien que son rôle précis dans les processus de lecture soit encore activement débattu ((McCandliss et al., 2003; Price and Devlin, 2003); voir paragraphe E.2. sur le 'Traitement lexical').

Dans leur étude de 1998, Shaywitz et al. (Shaywitz et al., 1998) ont observé, outre l'hypoactivation des aires postérieures du langage, une hyperactivation de l'**aire de Broca**, reflétant probablement un effort accru nécessaire aux dyslexiques dans la réalisation d'une analyse phonologique.

Dans leur étude en MEG, Salmelin et al. (Salmelin et al., 1996) observaient, outre

l'hypoactivation de la région temporo-occipitale inférieure gauche, une hyperactivation de l'aire frontale inférieure gauche 400 ms après l'onset, chez les sujets dyslexiques. Cette activation anormale de l'aire de Broca pourrait résulter de stratégies articulatoires compensatoires (Brunswick et al., 1999).

Ce phénomène d'hyperactivation de l'aire frontale inférieure gauche n'est pas généralisable puisqu'une diminution de l'activité de cette aire est observée dans certaines études sur la dyslexie (voir (Demonet et al., 2004)).

E.5.c. Conclusion

Il existe donc trois régions majeures déficitaires chez les dyslexiques dans des tâches langagières en modalité visuelle : (1) l'aire frontale inférieure gauche, sur- ou sous-activée chez les dyslexiques, probablement du fait d'une analyse phonologique compensatoire accrue, ou de stratégies articulatoires compensatoires ; (2) les gyri angulaire et supramarginal gauches dont la sous-activation chez les dyslexiques induirait des déficits dans les tâches de lecture et/ou phonologiques ; (3) l'aire temporo-occipitale gauche, dont le déficit d'activation pourrait expliquer les difficultés des dyslexiques dans le traitement pré-lexical de mots lus. Ces trois zones cérébrales sont reportées sur la figure 1.15.

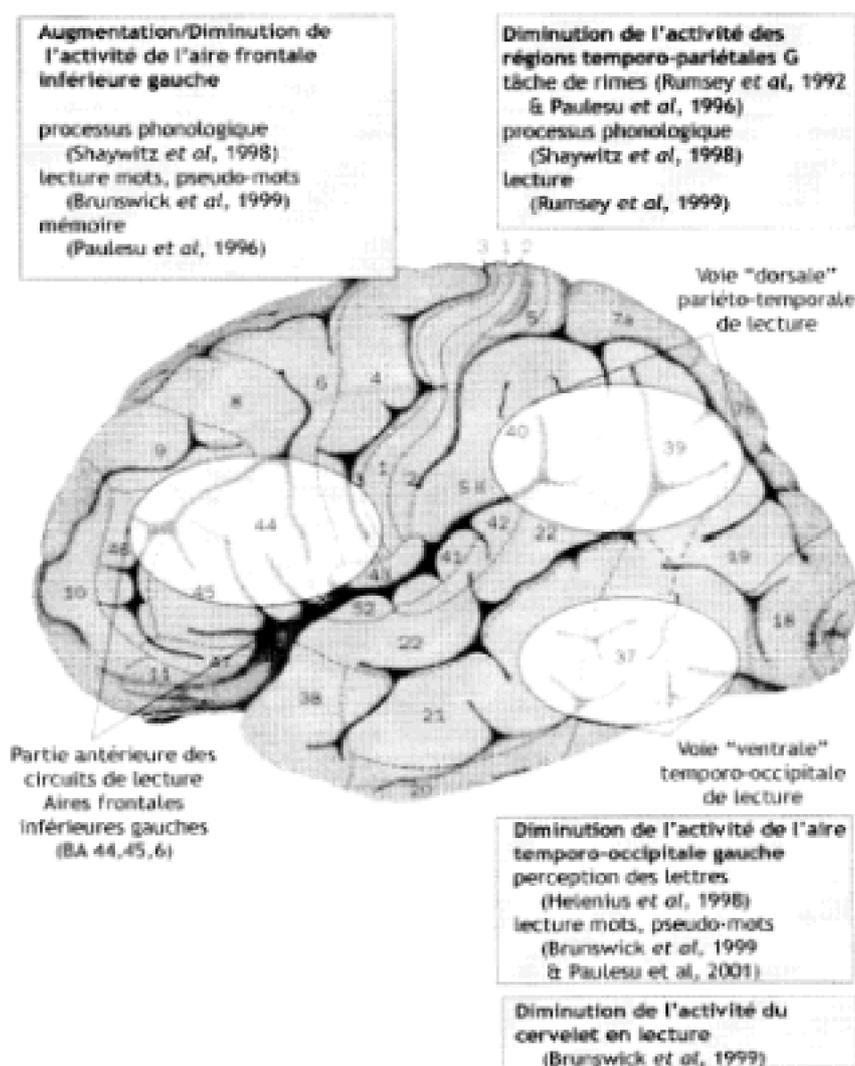


Figure 1.15 : Aires cérébrales déficitaires chez les sujets dyslexiques par rapport aux sujets normo-lecteurs, en modalité visuelle (adapté de (Demonet et al., 2004))

E.6. Course temporelle du traitement de stimuli langagiers

L'étude de la chronométrie des processus cognitifs liés à la lecture est un travail délicat, puisque de nombreux traitements, très variés et hautement spécialisés, opèrent en parallèle. Comme le soulignent Sereno & Rayner, le temps de fixation d'un mot au cours de la lecture, avant qu'il n'y ait saccade, est en moyenne de 250 ms (Sereno and Rayner, 2000). Ainsi, la perception visuelle d'un mot, ainsi que la majorité des traitements qui lui sont associés (phonologiques, sémantiques...) doivent être réalisés en 200 ms environ (Posner et al., 1999; Sereno and Rayner, 2000). Seulement, la conception classique concernant la temporalité de la reconnaissance de mots est que les 200 premières millisecondes après présentation du stimulus ne sont destinées qu'aux traitements sensoriels et perceptifs dans les aires corticales modalité-spécifiques, aires uniquement sensibles aux caractéristiques physiques des stimuli (luminosité, contraste, complexité

spatiale...) (Proverbio et al., 2004; Proverbio and Zani, 2003). Il semble malgré tout de plus en plus évident que ce genre de stimuli peut être reconnu et catégorisé dans les 150 premières millisecondes, et que des influences 'top-down' de haut niveau peuvent intervenir, et se coupler aux effets purement sensoriels de type 'bottom-up'.

Nous allons passer en revue les composantes typiques des Potentiels Evoqués (PE) et de la MEG, et leurs fonctions associées : Il existe deux composantes sensorielles dont la distribution topographique varie en fonction de la modalité sensorielle (distribution temporelle en modalité auditive, occipitale en modalité visuelle) : la P1 et la N170³². D'autres composantes reflétant des traitements de haut niveau sont régulièrement étudiées, dont les principales sont la P300 pour les effets attentionnels, la N400 pour les effets sémantiques et la P600 pour les traitements syntaxiques. Nous ne nous intéresserons, pour cette présentation de l'état de l'art en électrophysiologie, qu'aux données sur la reconnaissance visuelle de mots, l'exclusivité de nos travaux en Potentiels Evoqués ayant été réalisée en modalité visuelle.

E.6.a. Traitements visuels 'de bas niveau' (onde P100 ou P1)

L'évènement électrophysiologique **P1** semble être le témoin d'un traitement visuel 'primaire' ; l'extraction des traits visuels du stimulus selon une trame rétinotopique (Tarkiainen et al., 2002).

Cet évènement est observé sur tout tracé de PE obtenu après présentation visuelle de visages, d'objets ou de caractères linguistiques (Cohen et al., 2000; Halit et al., 2000; Itier and Taylor, 2002; Itier and Taylor, 2004; Proverbio et al., 2002a; Proverbio et al., 2004). Sa latence est d'environ 80-100 ms post-stimulation. La source de cet évènement est localisée au niveau du cortex extra-strié ventro-latéral (Kutas and Dale, 1997), les générateurs étant situés dans les aires BA 18/19.

La latence et l'amplitude de cette onde peuvent varier en fonction des conditions de stimulation. Par exemple, la P1 est plus précoce et moins ample pour une présentation de mots que pour des visages ou des voitures (Rossion et al., 2003). Cette onde est aussi sensible aux effets attentionnels puisque les stimuli faisant partie d'une catégorie 'cible' prédéfinie induisent une P1 plus ample que les stimuli inattendus.

Dans leur contexte d'étude particulier (tentant de démontrer qu'un mot est catégorisé en 200 ms), l'équipe de Sereno observe des effets de forme des mots (différences entre mots et non-mots) dès l'évènement P1 (Sereno et al., 1998).

E.6.b. Traitement orthographique (évènement N170 ou N1)

Le premier traitement visuel spécifique à la reconnaissance d'éléments linguistiques – l'analyse orthographique – prend place 140 à 190 ms après présentation du stimulus (onde **N170** ou **N1**). Cette analyse a lieu dans les régions occipito-temporales (gyri lingual et fusiforme) (Kuriki et al., 1998; Proverbio and Zani, 2003).

³² Nous donnerons le nom des ondes selon la terminologie de l'EEG (N ou P), sachant que les mêmes ondes peuvent être obtenues en MEG, désignées alors avec la lettre 'M'.

Dans une étude en MEG, Salmelin et al. proposent qu'une activation occipito-temporale inférieure gauche, 150 ms après présentation visuelle d'un stimulus langagier, reflète le premier traitement spécifique aux lettres par rapport à tout autre symbole (Salmelin et al., 2000). Cohen et al. (Cohen et al., 2000) observent une négativité (N1) occipito-temporale contralatérale à la stimulation visuelle, 150 à 160 ms après présentation de mots et de non-mots. Ils proposent que cet événement électrophysiologique reflète l'activation de l'aire visuelle V4. Fiebach et al. (Fiebach et al., 2002) ont montré que les aires occipito-temporales bilatérales et le gyrus temporal supérieur médian gauche sont activés entre 170 et 230 ms après l'onset, qu'il s'agisse de mots ou de séquences de lettres.

De nombreux autres auteurs interprètent une négativité bilatérale entre 150 et 200 ms post-stimulation comme reflétant un traitement pré-lexical (Bentin et al., 1999; Cornelissen et al., 2003; Nobre et al., 1994; Pammer et al., 2004; Proverbio et al., 2002a).

De même que l'évènement P1, la composante N170 est plus ample lors de la présentation de stimuli 'attendus', reflétant un effet attentionnel (Hillyard et al., 1973; Kutas and Dale, 1997).

Dans la même lignée que pour les résultats présentés sur la P1, Sereno et al. proposent une tout autre interprétation de la N1 : cette onde étant sensible aux effets de fréquence lexicale des mots – ce qui serait un indicateur de l'accès lexical (Balota, 1990) – elle reflèterait l'accès lexical au cours de la lecture de mots isolés, plutôt qu'un traitement pré-lexical (Sereno et al., 2003; Sereno et al., 1998).

E.6.c. Traitement lexical (évènement N2)

Cohen et al. proposent qu'une négativité occipito-temporale gauche (180 à 200 ms) (**N2**), prolongée pour les mots par rapport aux non-mots, corresponde à l'activation du 'Visual Word Form System' (Cohen et al., 2000). Cette temporalité reflèterait la transition entre les effets purement visuels induits par la présentation d'un mot, et le début des effets lexicaux.

En effets, cette onde est spécifiquement observée lors de la reconnaissance de mots et de pseudo-mots, mais pas de non-mots et de séquences de caractères non alphabétiques (Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002; Petersen et al., 1990). Elle est aussi plus ample pour les lettres que pour les chiffres (Polk et al., 2002). Mais de même qu'en localisation (voir paragraphe E.2. sur le 'Traitement lexical'), le débat reste ouvert quant à la spécificité de cette activation au traitement des mots, versus tout autre stimulus visuel.

D'après Pammer et al. (Pammer et al., 2004), l'activation de la VWFA – 200 ms après présentation du stimulus visuel – serait accompagnée d'une activité dans le gyrus frontal inférieur (BA 44/6), le gyrus temporal antérieur médian (BA 21/38) et le gyrus temporal postérieur médian (BA 37/39).

La temporalité de l'accès lexical au cours de la lecture demeure énigmatique, puisque les expériences réalisées sur les effets de fréquence lexicale ont mené à des résultats aussi variables qu'une sensibilité lexicale précoce (150 ms) (Proverbio et al., 2004;

Sereno et al., 1998) à des différences n'apparaissant que 500 ms après stimulation (Polich and Donchin, 1988). Il n'en demeure pas moins que de nombreuses expériences répertorient des activations latéralisées à gauche, entre 180 et 250 ms post-stimulation, spécifiques à la présentation de mots (Pammer et al., 2004; Proverbio et al., 2002a; Salmelin et al., 1996; Tarkiainen et al., 1999).

Il existerait par ailleurs un traitement spécifique des séquences de lettres n'étant pas des mots, dans les **aires frontales inférieures gauches**, entre **170 et 230 ms** après stimulation (Fiebach et al., 2002; Rodriguez-Fornells et al., 2002). Ceci est en accord avec le modèle de la lecture à double voie, ces activations représentant les traitements opérés sur les séquences alphabétiques ne rentrant pas dans la voie directe de lecture. Cette région ferait partie de la voie phonologique de lecture, assurant entre autres l'assemblage phonologique des pseudo-mots.

E.6.d. Traitement phonologique

La **MMN**, ou **PMN** ('MisMatch Negativity' ou 'Phonologic Mismatch Negativity') est un potentiel évoqué caractérisé par une déflexion négative fronto-centrale, entre 100 et 300 ms après présentation d'un stimulus auditif aberrant entendu de manière aléatoire dans une succession de stimuli semblables. Son générateur serait situé dans le cortex auditif supra-temporal (Connolly and Phillips, 1994; Naatanen et al., 1978).

Proverbio et al. ont quant à eux attribué une activation temporelle, environ 100 ms après l'onset, aux processus de mémoire à court terme phonologique. Ils proposent aussi, en accord avec l'hypothèse des deux voies de lecture, que l'activation au niveau des électrodes antérieures gauches, 160-215 ms après l'onset, révèle la mise en place de processus phonologiques (Proverbio and Zani, 2003).

E.6.e. Effets attentionnels (évènement P300)

Lorsque l'on présente des stimuli identiques et successifs à un sujet, quelle que soit la modalité sensorielle, l'apparition d'un stimulus peu fréquent induit une large positivité – P3b – dans le décours des PE, maximale au niveau des électrodes pariétales. De plus, si l'on ajoute dans l'expérience un nouveau stimulus non fréquent, une nouvelle composante P300 est observée – la P3a – qui est maximale au niveau des aires fronto-centrales. La **P3a** semble être un marqueur de l'évaluation du signal et des variations automatiques d'attention (Comerchero and Polich, 1998; Escera et al., 1998; Katayama and Polich, 1998) alors que la **P3b** serait associée aux opérations en mémoire de travail (Donchin et al., 1986; Fosker and Thierry, 2005; Polich and Kok, 1995).

De manière générale, l'**amplitude de la P300** est connue pour refléter la quantité de ressources attentionnelles allouées à une stimulation (Kramer and Strayer, 1988; Wickens et al., 1983), alors que sa **latence** refléterait le temps requis pour la catégorisation d'un stimulus (Kutas et al., 1977; McCarthy and Donchin, 1981; Polich, 1986).

D'autres évènements électrophysiologiques semblent être liés aux effets attentionnels : Les études réalisées en Potentiels Evoqués montrent qu'il existe des traitements précoces et tardifs dans l'attention visuelle (pour une revue, voir (Luck et al.,

2000)). L'attention sélective précoce influencerait les traitements dès 60-100 ms après apparition des stimuli (Hillyard and Munte, 1984; Mangun and Hillyard, 1988) : les composantes sensorielles précoces du signal sont typiquement plus amples si la localisation visuelle du stimulus est attendue par le sujet que si elle ne l'est pas.

Par ailleurs, l'implication du cortex pré-frontal inférieur dans les mécanismes attentionnels se traduit par une **déviante négative du tracé** de Potentiels Evoqués (Naatanen et al., 1992; Thierry et al., 2003a; Thierry et al., 1998; Thierry et al., 2003b). Cette dérive est observée au cours d'une tâche dans laquelle le sujet doit maintenir son attention sur un item particulier, en attendant la présentation d'un autre item par exemple.

L'évènement P300 peut aussi refléter un autre phénomène, dans des tâches n'impliquant pas d'effet attentionnel particulier ou de stimuli déviants : la reconnaissance de mots induit une **P300**, qui est plus ample pour les stimuli visuels communs, que ce soit des mots, des images, des visages... (Rudell and Hua, 1997). Par exemple, une P300 est observée lorsque les sujets voient des mots, mais pas lorsqu'ils voient des pseudohomophones ou des mots écrits avec changements de casse ('mixed case words' : eg. tAbLe) (Sauseng et al., 2004).

E.6.f. Traitement sémantique (évènement N400)

L'évènement **N400** – mis en évidence par Kutas et Hillyard (Kutas and Hillyard, 1980) dans une tâche de présentation visuelle de phrases – est induit par une anomalie sémantique dans un stimulus langagier, en modalité visuelle (Hagoort et al., 2003) ou auditive (Friederici et al., 1993). On parle classiquement d'"*effet N400*". Cet évènement reflète les traitements impliqués dans l'intégration sémantique (Friederici, 2004; Holcomb, 1993; Kutas, 1987; Kutas, 1997; Kutas and Hillyard, 1980; Kutas et al., 1988). Il est localisé au niveau des électrodes centro-pariétales.

Dès 200ms, mais avec un pic d'activation entre 300 et 550ms, des activations sont enregistrées dans le gyrus temporal postérieur médian gauche (BA 37/39), dans les gyri supramarginal et angulaire ainsi que dans l'operculum temporal supérieur. Le gyrus temporal postérieur médian gauche, le gyrus supramarginal et le gyrus angulaire seraient des aires associatives cross-modales permettant la convergence des informations orthographique, phonologique et sémantique sur le mot présenté en stimulation.

De nombreuses autres régions semblent être impliquées dans les traitements sémantiques (voir paragraphe E.2.b, Traitement sémantique), ce qui se répercute aussi sur les résultats d'électrophysiologie : certains auteurs observent une activation frontale inférieure gauche environ 220 ms après stimulation, qui serait liée au traitement sémantique (Abdullaev and Bechtereva, 1993; Abdullaev and Posner, 1998; Posner et al., 1988; Raichle et al., 1994). Les traitements sémantiques impliqueraient aussi une activation temporo-pariétale gauche, 600 ms après stimulation, et une activation cingulaire antérieure 170 ms après stimulation (Abdullaev and Posner, 1998).

E.6.g. Traitement syntaxique (LAN et évènement P600)

La **LAN** (Left Anterior Negativity) semble refléter le traitement syntaxique précoce et

automatique (Friederici, 2004). Cette négativité est observée sur les électrodes antérieures gauches, environ 180 ms après présentation auditive d'une aberration syntaxique, puis est suivie d'une négativité vers 400 ms (Friederici et al., 1993).

La **P600** reflète quant à elle un traitement syntaxique plus tardif et contrôlé, par exemple dans le cas d'une réanalyse entraînée par une violation syntaxique ("*effet classique P600*") (Friederici, 2004; Munte et al., 1997) : Hagoort et al. (Hagoort et al., 2003) ont ainsi observé une P600 postérieure, environ 600 ms après présentation d'une violation syntaxique en modalité visuelle, associée à une négativité frontale bilatérale entre 300 et 500 ms.

Récemment, l'**effet P600** a été observé dans des tâches impliquant des anomalies sémantiques (Hoeks et al., 2004; Kim and Osterhout, 2005; Kolk et al., 2003; Kuperberg et al., 2003; van Herten et al., 2005). Selon Kolk et al. (Kolk et al., 2003), lorsqu'un stimulus linguistique incohérent est traité (e.g. 'Sur la mer se dessinent de nombreux râteaux'), et que dans le même temps un élément linguistique différent mais formellement proche est fortement attendu (e.g. 'Sur la mer se dessinent de nombreux bateaux'), le cerveau réanalyse l'input pour vérifier qu'il n'y a pas eu erreur de traitement de l'information. Il s'agit de l'hypothèse du '*P600 monitoring*' : un système de contrôle du traitement aurait lieu dans la perception du langage, comme cela a déjà été observé en production de langage (Levelt, 1983) et en activation motrice (Holroyd and Coles, 2002). Ceci permettrait à un lecteur, lorsqu'il perçoit un message linguistique incongru, de contrôler si le message était celui-ci, ou s'il s'agit d'une erreur de traitement.

E.6.h. Traitement morphologique

Dans une tâche de décision lexicale avec amorçage, Stanners et al. (Stanners et al., 1979) observent un effet facilitateur de reconnaissance d'un verbe régulier, qu'il soit amorcé par lui-même ou par sa forme passive. Par contre, l'effet facilitateur d'amorçage d'un verbe irrégulier par sa forme passive n'est pas aussi important que celui d'un amorçage par lui-même. Ces observations vont dans le sens de la théorie d'un stockage en mémoire différent des verbes réguliers et irréguliers (voir (Pinker and Ullman, 2002)). Munte et al. (Munte et al., 1999) ont montré grâce au même type de tâche d'amorçage que l'identification d'un verbe régulier amorcé par sa forme passive est associée à une N400 réduite en amplitude, effet qui n'est pas retrouvé pour un verbe irrégulier pareillement amorcé. Mais, la tâche utilisée par Munte et al. étant une tâche d'amorçage avec délai, il est possible que la différence d'effet N400 entre verbes réguliers et irréguliers soit due à des différences entre les deux types de verbes en terme de mémoire épisodique plutôt qu'en terme d'organisation lexicale.

E.6.i. Conclusion et modèle

Dans le modèle synthétique sur l'identification de mots proposé à la fin du chapitre sur la localisation des fonctions langagières (voir figure 1.13 ; paragraphe E.3.a), nous avons tenté de coupler les données connexionnistes aux données localisationnistes. Nous allons maintenant reprendre une partie de ce modèle, auquel nous ajouterons des informations temporelles. Ce modèle de reconnaissance visuelle de mots, avec les informations

spatiales et temporelles correspondant à chaque phase de traitement, est présenté figure 1.16 – ce modèle nous servira de base théorique pour la suite de nos travaux présentés dans les chapitres suivants.

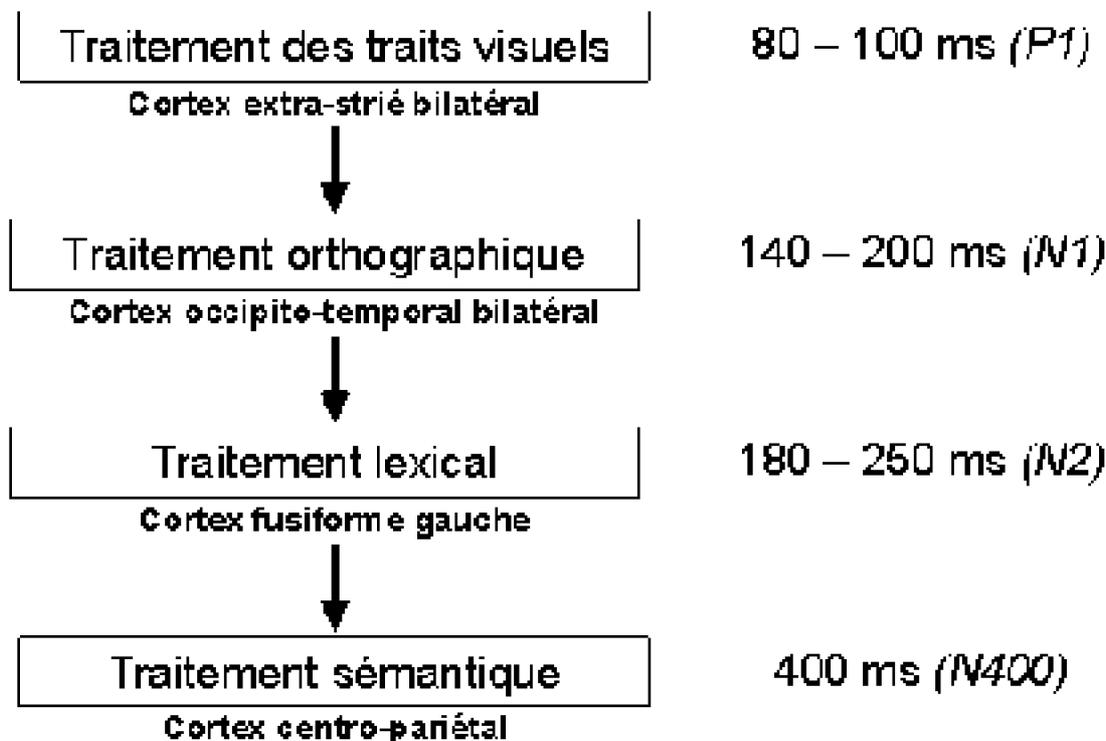


Figure 1.16 : Modèle de reconnaissance visuelle de mots, couplé à des informations spatiales et temporelles.

E.7. Dyslexie et déficits temporels d'activations (études en EEG et en MEG)

Utilisant la réponse évoquée auditive spécifique qu'est la MMN ('MisMatch Negativity'), différentes équipes ont montré l'existence de déficits auditifs chez certains enfants ayant des difficultés d'apprentissage de la lecture (Kraus et al., 1996) (voir pour une revue (Leppanen and Lyytinen, 1997)). Les enfants ayant des difficultés de lecture réalisent moins bien les tâches de discrimination de parole que les enfants normo-lecteurs, ce déficit étant corrélé avec une diminution de la MMN. Ces résultats suggèrent que les enfants dyslexiques souffriraient de déficits des voies auditives, en amont de la perception consciente (la MMN étant corrélée au traitement auditif de bas niveau), mais uniquement pour le traitement du langage (voir (Bradlow et al., 1999; Schulte-Korne et al., 1998)).

Par ailleurs, l'asymétrie des ondes M100 et M260 (événements enregistrés en MEG, typiques du traitement phonologique) est réduite chez les sujets dyslexiques par rapport aux sujets normo-lecteurs (Heim et al., 2003; Paul et al., 2005). Cette perte d'asymétrie des activations pourrait résulter du défaut d'asymétrie du planum temporal (voir paragraphe D.5.f), observé chez de nombreux patients dyslexiques (Paul et al., 2005)

(voir (Heim and Keil, 2004) pour une revue).

Nous avons vu précédemment que l'analyse des traits visuels d'une séquence de lettres ou de tout autre symbole induit une activité dans le cortex extra-strié 100 ms après présentation du stimulus. Cette phase de traitement semble ne pas être déficitaire chez les sujets dyslexiques (Helenius et al., 1999b; Salmelin et al., 2000).

La première phase d'activation spécifique au traitement des lettres, reflétée par une activité occipito-temporale 150 à 200 ms après présentation du stimulus, diffère significativement entre les sujets dyslexiques et témoins dans de nombreuses études (onde N100 ou M100 retardée et réduite en amplitude chez les sujets dyslexiques) (Helenius et al., 1999b; Salmelin et al., 2000; Salmelin et al., 1996; Tarkiainen et al., 1999). Il semble que ce déficit de traitement soit spécifique aux séquences de lettres, puisque les ondes observées chez les sujets dyslexiques, 150 ms après présentation de visages ou de formes géométriques, ne diffèrent pas de celles des sujets contrôles (Tarkiainen et al., 2003).

Stelmack et al. (Stelmack et al., 1988) ont observé une composante P200 (traitement précoce des mots) plus ample chez les dyslexiques par rapport aux témoins, dans une tâche de lecture silencieuse. Taylor & Keenan (Taylor and Keenan, 1990) ont montré quant à eux que des sujets dyslexiques présentent un allongement des latences de N2 dans une tâche de décision lexicale, confirmant les observations précédentes de Ciesielski (Ciesielski, 1989).

D'une manière générale, les dyslexiques semblent être déficitaires dans les différentes phases de traitement des séquences linguistiques, à partir du stade de traitement spécifique des lettres (Helenius et al., 1999a; Salmelin et al., 2000). Chez ces patients, les ondes caractéristiques des traitements de lettres ou de mots sont moins amples et retardées par rapport aux sujets normo-lecteurs (Helenius et al., 1999a; Salmelin et al., 2000; Salmelin et al., 1996).

Différentes études ont rapporté que la P300 est réduite ou retardée chez des sujets dyslexiques (Holcomb et al., 1986; Lovrich and Stamm, 1983; Taylor and Keenan, 1990) et chez des enfants souffrant de déficits attentionnels (Holcomb et al., 1985). Duncan et al. (94) ont observé des anomalies de la P300 chez des adultes ayant souffert de dyslexie, mais uniquement chez ceux ayant souffert aussi de troubles attentionnels (syndrome d'hyperactivité ; ADHD) (Duncan et al., 1994). Ainsi, puisque des déficits attentionnels sont fréquemment observés chez les dyslexiques, il est difficile de prédire si les anomalies de P300 sont dues à la dyslexie en temps que telle, ou à ses troubles attentionnels associés (Taylor, 1995).

Des anomalies de la N400 ont été observées dans de nombreuses études sur la dyslexie, mais avec des résultats et donc des interprétations très différents : Stelmack et Miles (Stelmack and Miles, 1990) ont observé une N400 réduite chez les sujets dyslexiques, interprétant cette observation comme un déficit de mémoire sémantique à long terme. A l'inverse, Neville et al. (Neville et al., 1993) ou Robichon et al. (Robichon et al., 1994) ont observé une N400 plus ample chez des enfants ayant des déficits de langage ou chez des adultes dyslexiques. Ainsi, deux hypothèses sont valables au vue de ces résultats : l'intégration sémantique pourrait être déficiente ou plus coûteuse chez les

dyslexiques par rapport aux normo-lecteurs, ou bien les dyslexiques pourraient utiliser, quand ils lisent, des stratégies sémantiques différentes de celles des normo-lecteurs.

Enfin, les Potentiels Evoqués ont permis aussi de mettre en évidence un certain nombre de variations électrophysiologiques chez des sujets dyslexiques par rapport à des normo-lecteurs, pour ce qui est de l'analyse syntaxique (Breznitz and Leikin, 2000).

Conclusion

La plupart des études de neuroimagerie et d'électrophysiologie rapportées dans ce chapitre ont été réalisées chez des adultes ayant des séquelles de dyslexie, ce qui rend difficile l'estimation précise de l'étendue des troubles. De plus, les études sur des sujets dyslexiques ne tiennent pas compte des différents sous-types de dyslexies – dont les 'barrières' sont très vagues, rendant très difficile la classification d'un sujet dans un sous-type précis – ce qui peut éventuellement masquer certains déficits neurofonctionnels, du fait de la diversité des troubles de la population étudiée. Enfin, la variété des tâches utilisées dans les différentes études – relativement peu nombreuses – ne permet pas d'avoir des résultats suffisamment reproductibles et congruents pour tirer des conclusions définitives.

F. Synthèse

Les données de la littérature sur le langage sont très vastes, ce champ d'étude regroupant des travaux de recherche dans des domaines très variés. Nous baserons notre travail de recherche sur les connaissances théoriques issues de la linguistique et de la psycholinguistique. Nous détaillerons quatre études traitant plus particulièrement de la reconnaissance visuelle de mots isolés, et de certains effets "Bottom-up" et "Top-down" influençant ce processus. Parmi les multiples outils d'investigation qu'offrent la neuropsycholinguistique et la neurolinguistique, nous utiliserons la technique des PE afin d'étudier les processus de lecture chez des sujets normo-lecteurs et dyslexiques.

Les deux chapitres suivants seront consacrés à la présentation de notre problématique de travail, ainsi qu'à une description détaillée de la technique des PE. Les chapitres 4 et 5 reprendront les résultats de deux études sur les effets "Bottom-up" et "Top-down" influençant la reconnaissance visuelle de mots isolés chez des adultes normo-lecteurs. Ces mêmes expériences réalisées chez des adultes dyslexiques seront décrites au chapitre 6. Le dernier chapitre de ce manuscrit retracera les principaux apports de nos travaux au domaine d'étude du langage, dans le cadre multidisciplinaire des sciences cognitives.

Chap 2. Problématique générale

A. Postulat de départ

A.1. Processus de traitement visuel d'un mot

D'après les données de la littérature présentées dans le chapitre précédent, il semble plus approprié d'étudier des réseaux d'activations cérébrales plutôt que des aires isolées. Nous proposons que le traitement cognitif du langage soit dû aux activations simultanées et interactives de différentes régions cérébrales, plutôt qu'à des activations d'aires localisées ayant chacune une ou plusieurs fonctions précises. Nous allons nous intéresser dans la suite de cette thèse au réseau d'activations mis en place lors de l'identification de mots présentés en modalité visuelle.

La majorité des données de la littérature issues de la recherche en psycholinguistique et en neurolinguistique sont en accord pour définir que les processus d'identification d'un mot mettent en jeu des traitements orthographique, phonologique et sémantique (voir chapitre 1 ; paragraphe C.3.c.). Nous nous intéresserons, dans ce travail de thèse, aux traitements de type orthographique, qui peuvent être divisés en trois phases principales décrites dans le schéma suivant (Figure 2.1). Ce schéma est basé sur le

modèle IAM (McClelland and Rumelhart, 1981) (présenté au chapitre 1 ; paragraphe D.3.b) et complété par les données temporelles issues de la recherche en électrophysiologie (chapitre 1 ; paragraphe E.6.i)

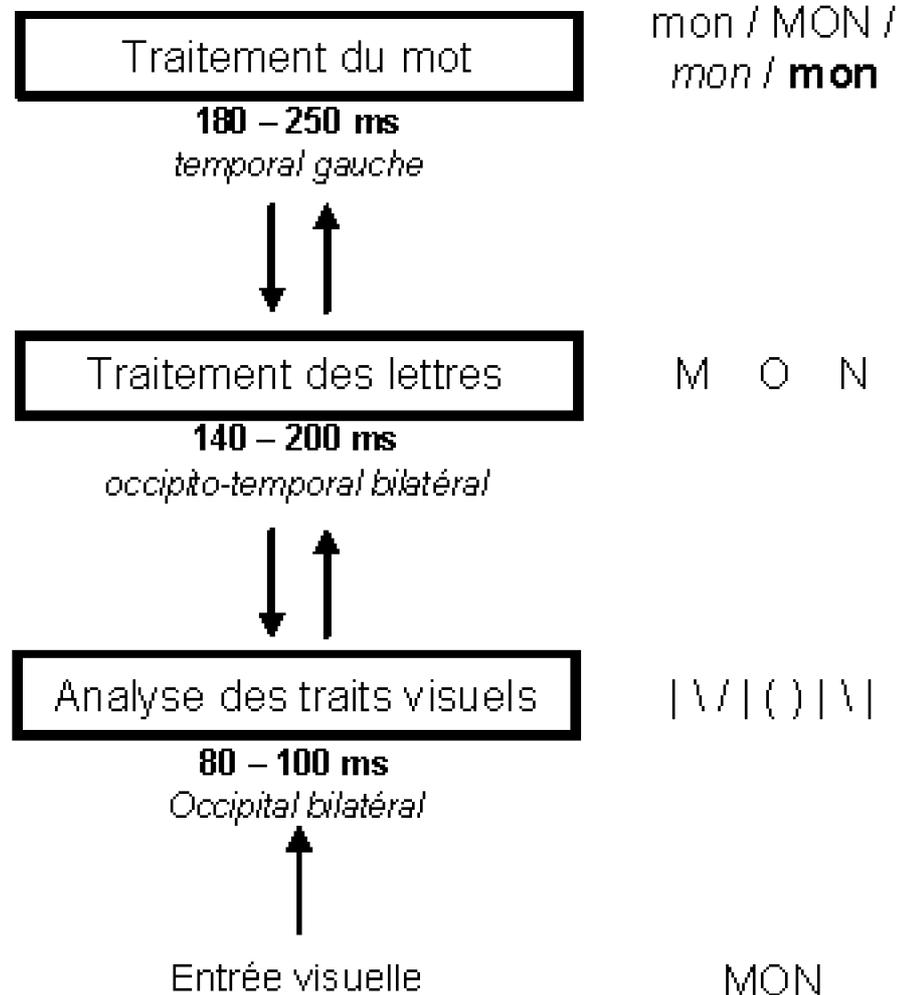


Figure 2.1 : Schéma des processus de traitement visuel du mot 'MON'.

De nombreuses observations de la lecture en situation écologique ainsi que les connaissances apportées par la recherche dans ce domaine permettent d'envisager l'existence d'interactions complexes entre ces différentes phases de traitement. Le traitement des mots n'est pas uniquement influencé par les différents facteurs venant du stimulus lui-même (effets "Bottom-up") mais également par des facteurs cognitifs propres au sujet et à son environnement (effets "Top-down").

A.2. Traitement des mots : effets "Top-down"

Il est couramment admis aujourd'hui que les différents modèles de reconnaissance de mots, d'objets ou autres ne doivent pas être uniquement sériels, mais tenir compte de nombreux effets interactifs (Bullier, 2001; Humphreys et al., 1997) : (1) le traitement à un

niveau supérieur peut débiter avant que celui au premier niveau d'analyse ne soit complété. (2) Des retours d'informations se font des derniers aux premiers niveaux de traitement tout au long de l'analyse (3) et des effets indépendants du stimulus influencent les différentes phases de son traitement (effets "Top-down"). Deux grandes classes d'effets "top-down" peuvent être mis en évidence lors de l'identification de mots en modalité visuelle : les effets "top-down" lexicaux et attentionnels.

La démonstration la plus évidente de l'existence d'effets "Top-down" lexicaux au cours du traitement d'une séquence de lettres est connue sous le nom d'"Effet de Supériorité du Mot" ou "Word Superiority Effect" (WSE) : une lettre est plus facilement reconnue si elle est contenue dans un mot plutôt que dans un non-mot (McClelland, 1979; McClelland and Rumelhart, 1981; Proverbio et al., 2004; Reicher, 1969) (pour plus de détails, voir l'introduction du chapitre 4).

Ce phénomène nous révèle que la connaissance antérieure d'un mot facilite la reconnaissance de ses lettres. Le WSE a été testé dans différentes études comportementales, révélant toujours le même effet de facilitation dans la précision et le temps de réponse des sujets (Grainger et al., 2003; McClelland, 1976).

S'il est admis aujourd'hui que la mémoire d'un mot influence l'identification ultérieure d'une de ses lettres, aucune expérience n'a jamais défini, à notre connaissance, à quel stade de traitement cet effet facilitateur prenait place.

Les effets Top-down attentionnels ont été fréquemment décrits grâce à deux paradigmes expérimentaux usuels :

(1) un sujet traite différemment un stimulus lorsqu'il réalise une tâche active (test de dénomination, de génération...) plutôt que lorsqu'il le voit passivement (Shulman et al., 1997a). Ce type de tâches met en évidence les effets de soutien d'attention : par exemple, les traitements visuels de mots lus peuvent augmenter lorsque les sujets doivent lire les mots à haute voix plutôt que silencieusement, même si les "inputs" visuels sont les mêmes (Price et al., 1997a; Shulman et al., 1997b).

(2) Par ailleurs, lorsque deux types de stimuli sont présentés simultanément à un sujet, les traitements seront influencés selon que le sujet porte son attention sur une catégorie de stimuli, l'autre ou les deux en même temps. Ce test d'attention sélective révèle par exemple que la focalisation de l'attention d'un sujet sur deux tâches simultanément entraîne une diminution des performances comportementales pour une tâche ou pour les deux (Meyer and Kieras, 1997; Navon and Miller, 2002) (pour plus de détails, voir l'introduction du chapitre 5).

Ces deux types d'effets attentionnels ont donc été testés en psychologie expérimentale, en imagerie et en électrophysiologie. Mais aucune étude, à notre connaissance, n'a testé les deux effets à l'aide d'un même paradigme, afin de connaître les incidences respectives de chaque effet attentionnel et leurs interactions. Il paraît donc intéressant de définir les phases de traitement d'un mot influencées par le soutien d'attention, l'attention sélective et l'interaction des deux effets.

Nous ne détaillerons pas plus les différents processus "Top-down" lexicaux et attentionnels dans ce chapitre, puisqu'ils seront décrits dans les introductions des

chapitres suivants traitant de nos résultats expérimentaux.

B. Problématique

L'objectif de ce travail de thèse est de définir quelle(s) phase(s) de traitement est (sont) influencée(s), au cours de l'identification d'un mot, par les effets "Top-down" lexicaux et/ou attentionnels. Le premier travail présenté dans la suite de ce manuscrit (chapitre 4) décrit une expérience qui nous a permis de mettre en évidence des effets "Top-down" lexicaux influençant l'identification des lettres d'un mot, grâce au paradigme de 'Reicher-Wheeler'. Dans le chapitre 5, nous décrivons les effets "Top-down" attentionnels mis en évidence grâce à un protocole original d'identification de paires de mots (paradigme Hold/Release). L'existence ou non de ces différents effets chez des sujets adultes dyslexiques sera développée dans le sixième chapitre.

La problématique générale de nos travaux de recherche peut être illustrée en se basant sur le schéma de notre postulat de départ (Figure 2.2).

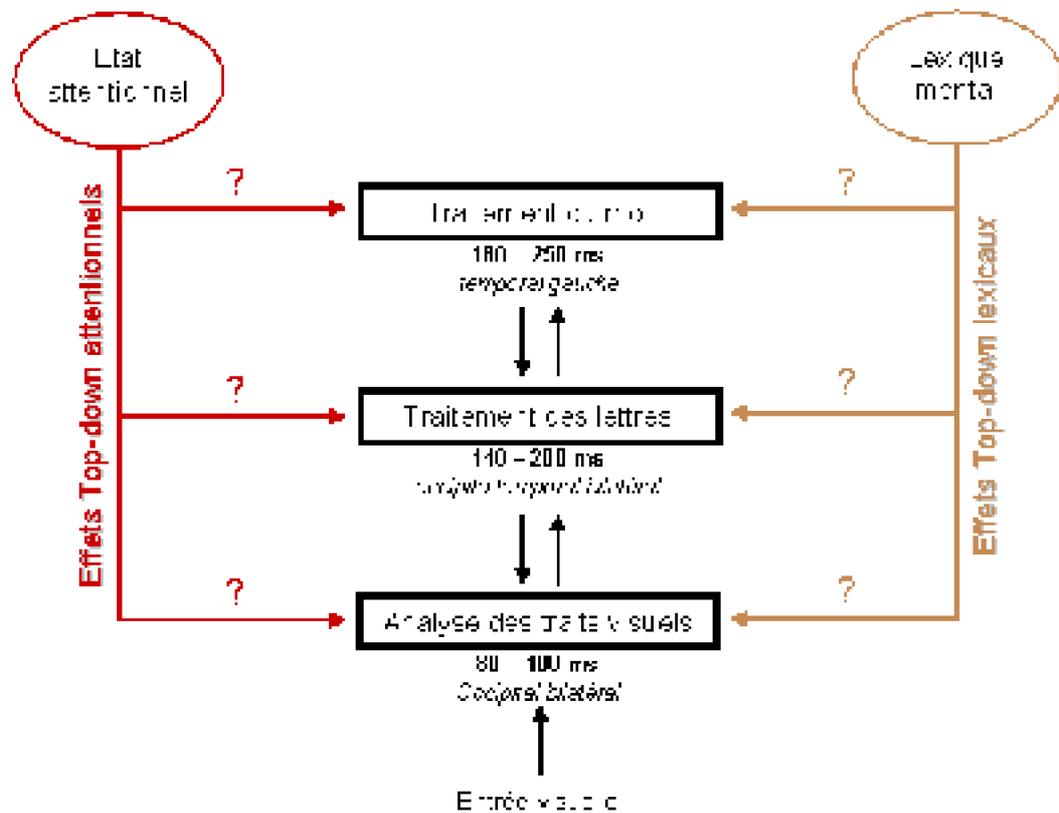


Figure 2.2 : Schéma synthétique de la problématique générale

Afin de définir quelle(s) phase(s) de traitement est (sont) influencée(s) par les conditions d'attention et les connaissances lexicales des sujets, nous avons utilisé la technique des Potentiels Evoqués. Cette technique nous a permis de comparer les décours temporels des activations cérébrales dans différentes conditions expérimentales, et ainsi de définir la temporalité des différents effets "Top-down" étudiés.

Chap 3. Matériel et méthodes

A. Les Potentiels Evoqués

Les neurones cérébraux induisent une activité électrique spontanée permanente dans le cerveau humain. Cette activité électrique intracérébrale induit des variations de différences de potentiel à la surface du scalp. L'enregistrement de ces fluctuations entre deux points du scalp d'un sujet humain constitue l'ElectroEncéphaloGraphie (EEG). Le déclenchement et le déroulement de processus mentaux induisent des modifications simultanées de l'activité électrique intracérébrale de base. Ces modifications d'activité électrique entraînent des variations d'amplitude et de répartition topographique des potentiels électriques à la surface du scalp. Les Potentiels Evoqués (PE) sont les signaux électriques, synchronisés avec la réalisation d'un processus mental, enregistrés en surface du scalp. L'enregistrement puis l'analyse de ces PE nous informe sur les variations d'activité électrique cérébrale induites par une tâche particulière.

Après avoir décrit le principe de base de l'EEG, nous détaillerons les techniques utilisées pour enregistrer le signal électrique. Nous décrirons ensuite les traitements et les analyses statistiques réalisés sur l'EEG pour obtenir les PE et les interpréter.

B. Genèse des potentiels électriques de surface

Lors de la propagation d'un potentiel d'action le long d'un axone, des ions Na^+ entrent dans la cellule au niveau du site actif par des canaux Na^+ voltage-dépendants. De part et d'autre de ce front de dépolarisation, un flux d'ions K^+ ressort par des canaux ouverts au repos ou à ouverture retardée. Cette portion axonale active peut être assimilée à un quadripôle de courant (deux dipôles inversés) (cf. figure 3.1).

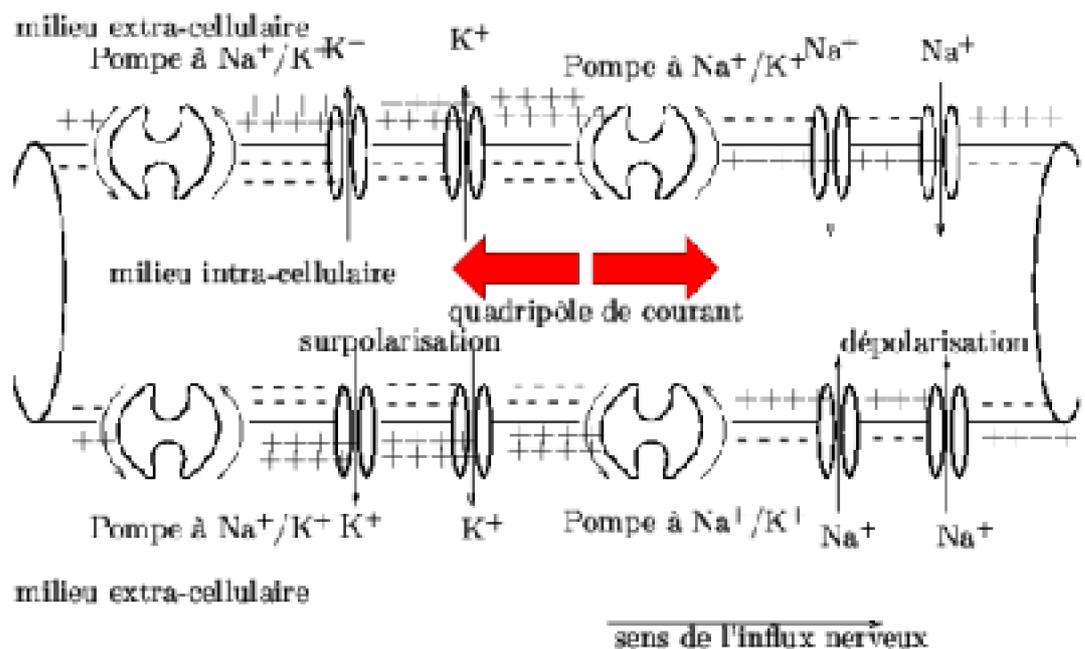
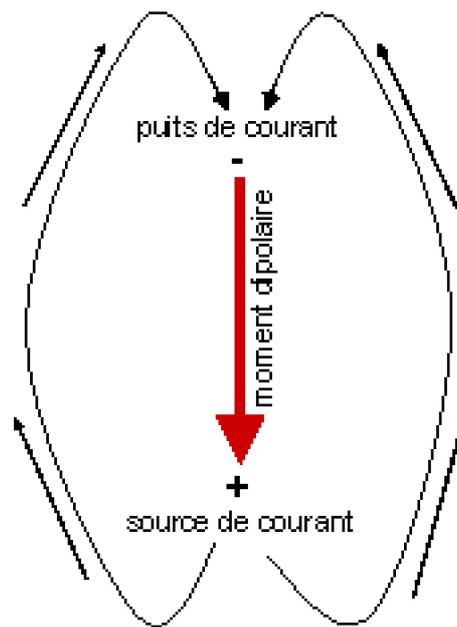


Figure 3.1 : Schéma de propagation du potentiel d'action



Dipôle de courant

Un dipôle de courant est l'association d'une source et d'un puits de courant très proches l'un de l'autre, dans un milieu conducteur. Une source de courant est une petite région de l'espace d'où émerge un courant électrique, alors qu'un puits de courant est une région où disparaît le courant circulant dans un milieu. Le potentiel électrique à une distance donnée est maximal sur la ligne reliant la source et le puits, il est nul dans une direction orthogonale. Un dipôle est défini selon son "moment dipolaire" représenté sous forme d'un vecteur. L'origine de ce vecteur est un point entre le puits et la source, il est orienté du puits vers la source, et sa norme est proportionnelle à l'intensité du courant qui sort de la source et qui rentre dans le puits.

Le potentiel créé par un quadripôle de courant s'annule avec la distance. Les potentiels d'action n'ont donc qu'une contribution très limitée dans la genèse des potentiels de surface.

Les dipôles de courant dont l'activité est enregistrée en surface du scalp proviennent principalement des terminaisons synaptiques. L'arrivée d'un potentiel d'action au niveau d'une synapse provoque la libération de neurotransmetteurs qui ouvre des canaux ioniques. Si la synapse est excitatrice, des ions Na^+ vont entrer dans la cellule et en faire un puits de courant. Le reste de la membrane du neurone post-synaptique va se comporter comme une source de courant (Martin, 1991). On obtiendra le schéma inverse dans le cas d'une synapse inhibitrice. La résultante des courants générés au niveau de chaque synapse d'un neurone peut être représentée par un dipôle unitaire (cf. figure 3.2). Si l'on observe les phénomènes résultant à l'échelle cellulaire, on voit que les différents types de cellules ne contribuent pas à part égale aux courants électriques globaux : dans le cas d'une cellule de type étoilée, où l'axe dendritique n'a pas d'orientation préférentielle, les différents dipôles induits à un instant t ont des directions très variables, et tendent donc à s'annuler. Ce type de cellules – inter-neurones du thalamus par exemple – ne crée quasiment pas de potentiel à distance. A l'inverse, au niveau d'un

neurone allongé, les différents dipôles ont des orientations très similaires, et s'additionnent. Ces cellules – neurones pyramidaux du cortex par exemple – induisent des courants électriques à distance (Nunez, 1981; Pernier and Bertrand, 1997) (Figure 3.2).

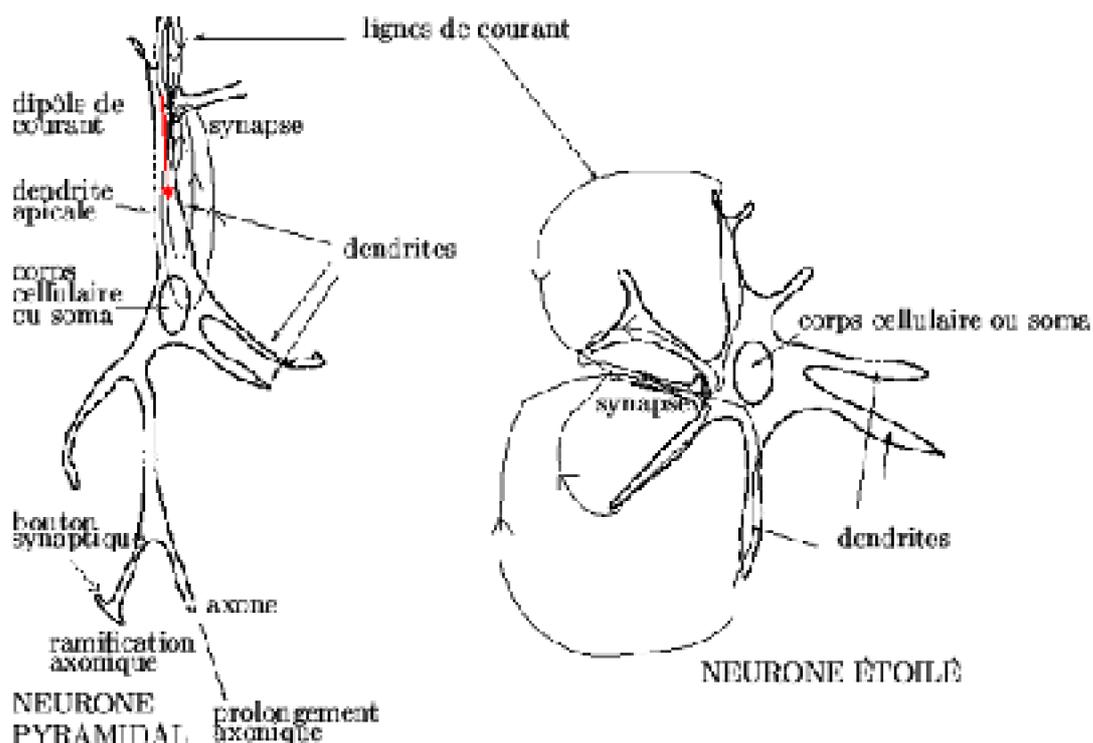
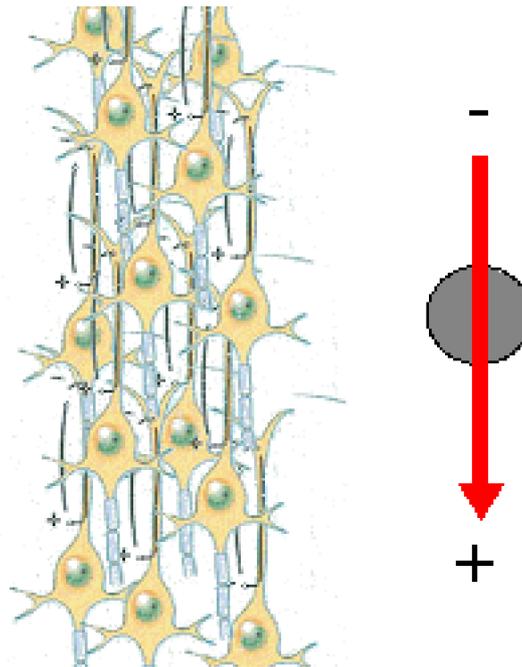


Figure 3.2 : Description d'un neurone pyramidal et d'un neurone étoilé. Une synapse excitatrice est représentée : elle provoque un puits de courant dans la région post-synaptique, ce qui provoque dans les milieux intra et extra-cellulaires des courants se refermant sur le reste de la membrane, lequel se présente donc comme une source de courant. Ces mouvements ioniques peuvent être modélisés en première approximation par un dipôle de courant, représenté par une flèche rouge.



Dipôle de courant équivalent à un groupe de cellules pyramidales du cortex

Si l'on considère un volume du cerveau où sont situés des neurones actifs, l'activité électrique de ce volume peut être schématisée par un dipôle de courant équivalent. Ce dipôle est la résultante de tous les dipôles décrits à l'échelle cellulaire. Plus les dipôles unitaires ont une orientation parallèle, avec puits et sources éloignés, plus le dipôle équivalent induit des courants électriques importants à distance. C'est le cas du cortex cérébral, où les cellules pyramidales – organisées en colonnes – ont leurs dendrites apicales orientées parallèlement entre elles et perpendiculairement à la surface du cortex.

Les courants électriques produits par les dipôles équivalents, lors d'une activation des neurones pyramidaux du cortex, vont se propager à distance, en passant trois barrières naturelles : le liquide céphalo-rachidien, la boîte crânienne et la peau. Le passage du courant dans ces tissus résistifs induit des différences de potentiels (selon la loi d'Ohm, $U = R.I$) Ce sont ces différences de potentiel qui seront enregistrées au niveau du scalp.

C. Enregistrement des différences de potentiel

L'enregistrement des potentiels en surface se fait au moyen d'électrodes (voies d'enregistrement) placées sur le scalp, reliées à des amplificateurs. Chaque amplificateur enregistre la différence de potentiel entre une électrode donnée et l'électrode définie comme référentielle. Cette différence de potentiel est enregistrée en continu grâce à un ordinateur.

C.1. Les électrodes

Deux systèmes d'enregistrement par électrodes sont utilisés dans les laboratoires de recherche. Le premier type d'équipement comprend des électrodes en étain, en argent ou en or. Ces électrodes sont circulaires et creuses, et fixées dans un bonnet qui est enfilé sur la tête du sujet. Pour faciliter le contact entre le scalp et les électrodes, et donc améliorer l'enregistrement du signal, le scalp est décapé à l'alcool au niveau de chaque électrode. Puis, chaque puits au centre d'une électrode est rempli de gel conducteur et abrasif (mélange à haute teneur en sels alcalins K^+ , Na^+ et Cl^-). Dans le deuxième type de matériel d'enregistrement, les électrodes sont des petites éponges imbibées d'eau salée. Les électrodes sont reliées entre elles par un filet d'élastiques, déposé sur la tête du sujet. Chaque éponge (électrode) est mise en contact avec le scalp, puis réimbibée d'eau pour améliorer la conductance³³ du courant. Quel que soit le matériel utilisé, les électrodes sont réparties sur le bonnet ou le filet de façon standardisée, selon le modèle "10-20 international" : 19 électrodes sont placées à des distances fixes de certains repères osseux (nasion,inion et les repères préauriculaires droit et gauche) (Figure 3.3a et b), puis les autres électrodes sont interposées entre celles-ci jusqu'à atteindre un total de 32, 64 ou 128 électrodes selon les équipements (Figure 3.3c).

³³ La conductance est l'inverse de la résistance ($G = 1/R$)

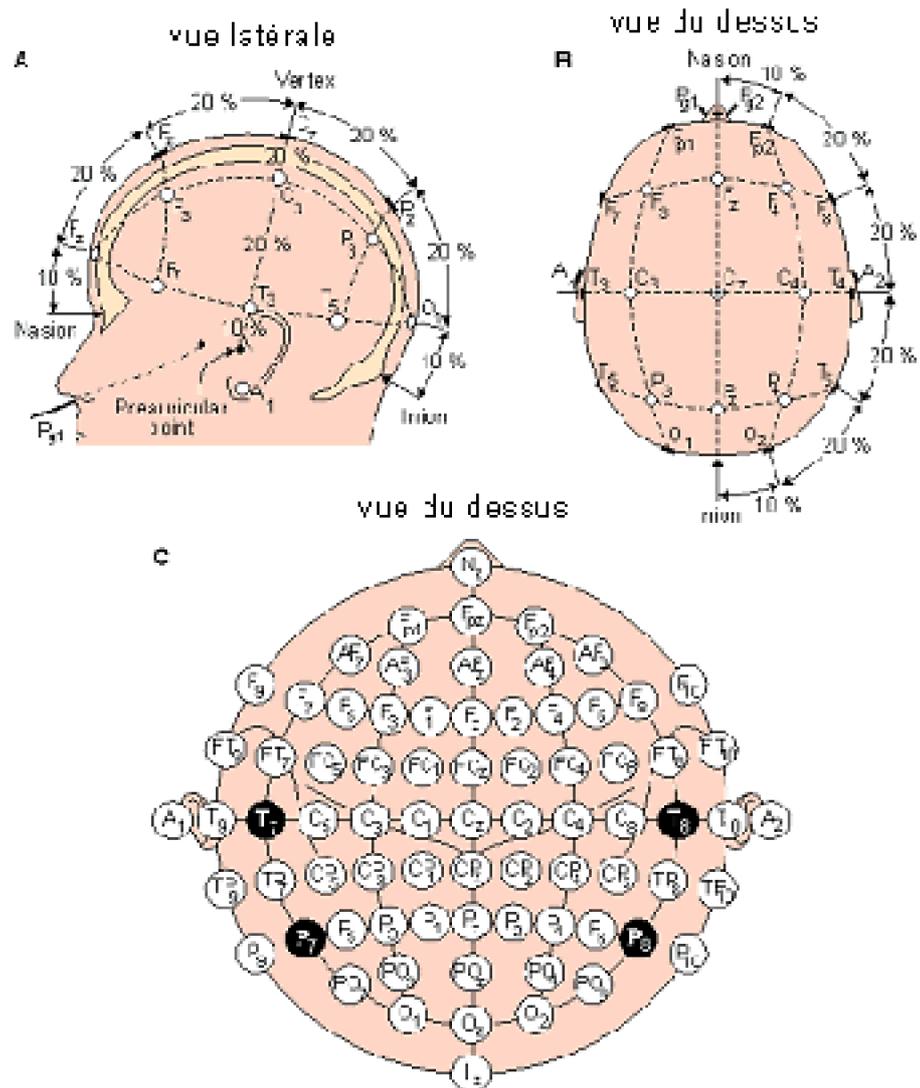


Figure 3.3 : a et b. Répartition des 19 électrodes standards selon le système "10-20 international". c. Répartition des électrodes sur un bonnet à 64 voies d'enregistrement (matériel utilisé dans nos expériences présentées dans les chapitres suivants)

Lorsque toutes les électrodes sont posées sur le scalp du sujet, leurs impédances sont contrôlées, et l'expérience est réalisée en général si toutes les valeurs d'impédances sont homogènes et inférieures à 20 k Ω .

L'impédance se mesure et s'obtient de la même manière que la résistance, à laquelle elle équivaut en courant continu. En courant alternatif, l'impédance est un nombre complexe ayant une valeur fixe de résistance et une phase qui varie en fonction de la capacitance du système (capacité à stocker de l'énergie).

Deux électrodes supra- et infra-orbitales sont ajoutées : elles permettent d'enregistrer les clignements oculaires du sujet tout au long de l'expérience, pour réaliser – au cours des traitements préliminaires du signal – une correction des artefacts oculaires (voir paragraphe C.3.a).

C.2. La référence

Un potentiel ne se mesure pas de manière directe, mais forcément par une différence de potentiel entre un point donné et un point de référence. L'électrode de référence idéale aurait la valeur de potentiel du scalp, et serait insensible aux générateurs de courant intracérébraux. Cette référence idéale n'existe pas. Les solutions adoptées peuvent être de placer l'électrode de référence sur le nez, sur le lobe d'une oreille ou en Cz (électrode centrale, voir figure 3.3c). Une autre technique, évitant les déséquilibres droite/gauche dus à une référence à l'oreille (donc non centrale), est de prendre comme référence la valeur de potentiel des oreilles liées. Mais aujourd'hui, la technique la plus couramment utilisée est celle de la référence moyenne : le potentiel moyen de tout le scalp est calculé (valeur moyenne de toutes les électrodes) et soustrait à la valeur de chaque voie d'enregistrement.

C.3. L'amplification du signal

Les différences de potentiel enregistrées grâce aux électrodes de surface sont de l'ordre du μV . Or, (1) le rapport signal/bruit a tendance à augmenter avec le transport du courant ; (2) les convertisseurs Analogique/Digital – utilisés dans l'enregistrement des EEG – mesurent des potentiels de l'ordre du mV. Ainsi, les potentiels enregistrés doivent être amplifiés à la source, avant leur transport vers le convertisseur. Une première amplification – d'un gain de 150 dans le cas de nos expériences – est faite au niveau du boîtier de connexion des électrodes, avec un amplificateur par électrode. Le courant passe ensuite, juste avant le convertisseur A/D (fréquence d'échantillonnage de 500 Hz), dans un amplificateur analogique (d'un gain de 500 dans nos expériences).

Avant tout enregistrement, une calibration est réalisée afin de vérifier que tous les amplificateurs fonctionnent, et amplifient le signal de façon homogène.

C.4. Le filtrage

Afin d'atténuer les effets de l'activité musculaire globale résiduelle, un filtrage passe-bande [0.1 – 100] Hz est réalisé au cours de l'acquisition.

C.5. L'enregistrement

Un enregistrement continu des potentiels de toutes les voies est réalisé tout au long de l'expérience. L'ordinateur enregistrant ces données reçoit deux autres types d'informations :

(1) le type et le temps d'apparition de chaque stimulation reçue par le sujet sont enregistrés, de manière à ce que l'on sache de manière exacte quelle stimulation le sujet a reçu, et à quel niveau de l'enregistrement EEG continu. Les stimuli sont indiqués sur le

signal grâce à des "triggers" de stimulation.

(2) le type et le temps d'apparition de la réponse du sujet à la stimulation peuvent aussi, selon les besoins de l'expérience, être enregistrés. Ceci permet ensuite (a) de connaître la réponse du sujet ainsi que son temps de réaction moyen (TR) ; (b) d'enlever de l'enregistrement du signal les stimulations pour lesquelles il a fourni une réponse incorrecte ou dont le TR est aberrant ; (c) de synchroniser les PE sur le moment de réponse, si l'on veut analyser les signaux en fonction de l'apparition de la réponse plutôt que de l'apparition de la stimulation.

A la fin de la phase d'acquisition des données, l'expérimentateur a à sa disposition le signal EEG continu du sujet, sur lequel apparaissent chaque stimulation et chaque réponse. Les Potentiels Evoqués seront obtenus grâce à une succession de traitements effectués sur ce signal continu d'EEG.

D. Obtention des Potentiels Evoqués

Un Potentiel Evoqué (ou Event-Related Potential) est une modification de l'activité électrique intracérébrale basale provoquée par la survenue d'un stimulus interne ou externe. L'étude des PE en recherche fondamentale consiste en général à comparer les activations électriques induites par deux ou plusieurs types de stimulations (S1, S2...). Au cours de l'acquisition de l'EEG, le sujet réalisant l'expérience reçoit différentes stimulations dans un ordre aléatoire afin d'éviter tout effet d'habituation. Par ailleurs, chaque type de stimulation est envoyé en grand nombre : les modifications du tracé consécutives à un stimulus donné sont trop infimes pour être visibles à l'œil nu et sont 'noyées' dans le bruit de l'EEG spontané, de l'ECG et de l'EMG (ElectroCardioGramme et ElectroMyoGramme). Seule la répétition de nombreuses reprises du même stimulus peut mettre le phénomène en évidence : les modifications de l'activité EEG survenant dans une étroite période de temps à la suite d'un stimulus donné sont moyennées pour augmenter le rapport signal/bruit. On obtient ainsi un fichier moyenné par type de stimulation et par sujet. Dans la majorité des études, un groupe de sujets passe la même expérience, et les résultats obtenus sont moyennés pour s'affranchir de la variabilité inter-individuelle. On obtient alors un fichier moyenné entre les différents essais et les différents sujets, pour une condition donnée. Les différentes conditions de l'expérience peuvent alors être comparées à l'aide de différents tests statistiques réalisés sur le signal.

D.1. Traitements préliminaires

Les enregistrements continus sont tout d'abord filtrés. Un filtre passe-haut à 1 Hz peut être réalisé afin de s'affranchir d'éventuelles dérives lentes dans les tracés. Par ailleurs, un filtre passe-bas à 30 ou 40 Hz est systématiquement appliqué aux enregistrements afin de filtrer le signal produit par le courant alternatif (50 Hz et harmoniques). De telles applications de filtres n'impliquent pas de pertes importantes d'information puisque les

variations de potentiel pertinentes en PE se situent approximativement dans la bande de fréquence [1 – 15] Hz.

Une correction des artéfacts oculaires est ensuite appliquée aux enregistrements continus : en effet, les clignements oculaires induisent, principalement au niveau des électrodes frontales, d'importantes déviations de potentiels. Différents algorithmes peuvent être utilisés pour corriger ces variations, qui ont été enregistrées au cours de l'acquisition grâce à deux électrodes supplémentaires placées au-dessus et en dessous de l'œil du sujet : après calcul de la moyenne et de la variance d'un clignement oculaire moyen (calcul basé sur le repérage dans le signal continu de 20 artéfacts au minimum), l'influence de chaque clignement sur les différentes voies d'enregistrement est évaluée et corrigée.

Le signal est ensuite épuré grâce à une correction d'artéfacts : les portions bruitées du signal continu (suite à un mouvement du sujet, une contraction de la mâchoire, un froncement de sourcils, des mouvements oculaires répétés ou latéraux...) sont supprimées. Selon le design expérimental, il est aussi souvent recommandé d'éliminer les portions de signal correspondant à une réponse fautive donnée par le sujet.

L'enregistrement continu est ensuite segmenté en n blocs (pour n stimulations) selon un intervalle pré- et post-stimulation défini par l'expérimentateur. Cette segmentation se fait en référence aux "triggers" présents dans l'enregistrement, signalant l'apparition de chaque stimulation, ainsi que son type (grâce à un codage numérique). Une correction de ligne de base est appliquée à tous les blocs, en se basant sur l'activité électrique moyenne précédant la stimulation.

D.2. Obtention des Potentiels Evoqués

Les blocs correspondant à des stimulations similaires sont moyennés, grâce aux "triggers". Rappelons que cette étape est primordiale puisque les tracés de potentiels observés jusque là résultent de milliers d'activités différentes simultanées. En moyennant les tracés consécutifs à une même stimulation (environ 30-40 essais par sujet et par condition), l'importance relative des courants électriques aléatoires par rapport à ceux associés à la tâche diminue, et il ne ressort que les potentiels générés par une stimulation (Potentiels Evoqués), dans la mesure où leur apparition est synchronisée par les "triggers".

Les tracés individuels de chaque condition sont ensuite moyennés au sein du groupe de sujets, et on obtient ce qui est classiquement appelé des "grandes moyennes".

D.3. Visualisation des Potentiels Evoqués

Les PE peuvent être visualisés de deux façons : (1) les tracés de potentiels peuvent être observés, pour chaque voie d'enregistrement, sur un graphique représentant l'amplitude du potentiel au cours du temps (Figure 3.4a). Ceci permet entre autre de repérer des pics positifs ou négatifs de potentiels ou de comparer les tracés de deux ou plusieurs électrodes, et de deux ou plusieurs conditions expérimentales. (2) Il est aussi possible de

réaliser des cartographies de potentiels par interpolation des valeurs du potentiel en chaque électrode (Figure 3.4b). Ceci permet de visualiser la distribution des PE sur tout le scalp, à un instant donné.

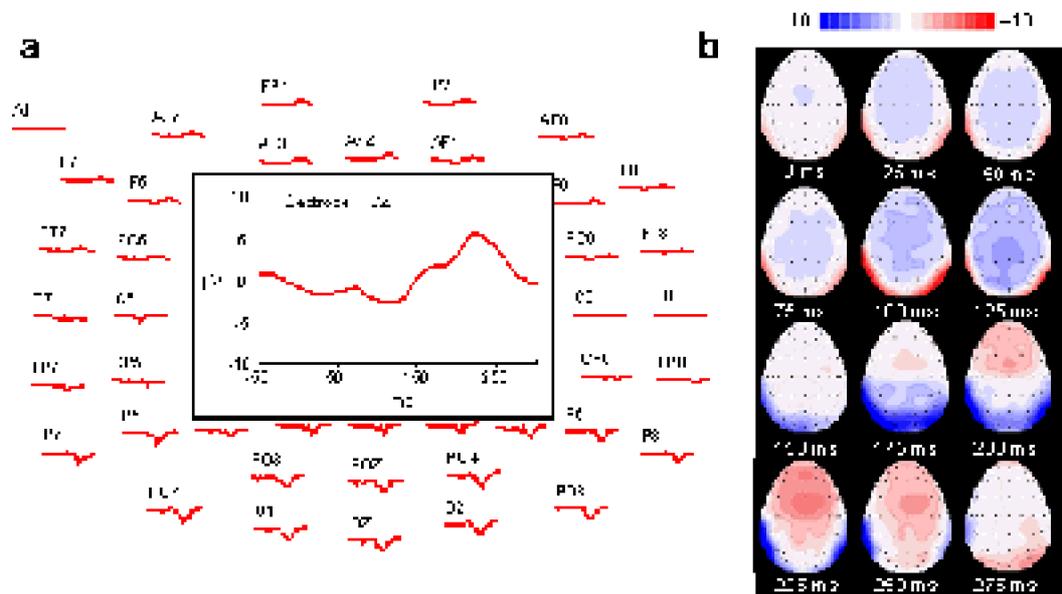


Figure 3.4 : Visualisation des Potentiels Evoqués. *a.* Tracés des amplitudes de potentiel en fonction du temps, sur 64 électrodes (zoom sur l'électrode centrale FCz). *b.* Cartographies de potentiels à 12 instants de l'enregistrement.

E. Analyses statistiques

E.1. Comparaisons de latences et d'amplitudes de pics

Les analyses statistiques débutent par une observation des tracés obtenus avec les grandes moyennes. Ceci permet de repérer sur les courbes de potentiels les différents pics caractéristiques de la tâche. Pour chaque pic, une électrode de référence sera définie, l'électrode choisie étant généralement celle où l'amplitude de l'évènement est la plus grande. La latence du pic sera celle de l'électrode de référence. La fonction "Mean Global Field Power" des logiciels d'analyse est ensuite utilisée : elle permet de superposer sur un même axe les tracés de toutes les électrodes. Sur ce tracé global, on relève l'intervalle d'apparition de chaque pic. Manuellement ou à l'aide de programmes automatisés, on détecte alors la latence, l'amplitude et l'amplitude moyenne de chaque pic. La latence est la même pour chaque électrode et correspond à celle de l'électrode choisie en référence. L'amplitude du pic est celle relevée, sur chaque électrode, à la latence de référence. L'amplitude moyenne est, pour chaque électrode, la moyenne des amplitudes de tous les points de l'intervalle de recherche défini précédemment (Picton et

al., 2000).

Latences, amplitudes et amplitudes moyennes sont comparées, entre les différentes conditions expérimentales, à l'aide d'ANOVA à mesures répétées. Les effets des différents facteurs analysés ainsi que leurs interactions sont calculés, pour chaque évènement électrophysiologique.

Dans la majorité des expériences, les réponses des sujets sont enregistrées au cours de la tâche. Les taux d'erreurs et les temps de réaction des sujets peuvent alors être analysés de la même manière, par ANOVA à mesures répétées.

E.2. tests *t* en séries appariées

Les tracés de PE peuvent aussi être comparés dans certaines régions du scalp sans qu'il y ait de pics de potentiels. Il est possible, dans ce cas de figure, de comparer deux conditions expérimentales, par test *t* en séries appariées : les différences individuelles entre deux conditions sont calculées, en chaque point du tracé de potentiel (une valeur de différence toutes les 2 ms pour un échantillonnage à 500 Hz). Un test *t* est ensuite réalisé sur la moyenne de ces différences. Il est possible de savoir si la différence entre les deux conditions est significative ou non, tout au long du décours temporel du tracé. On considère arbitrairement qu'une différence entre deux conditions est significative si le test *t* est significatif sur un intervalle de temps suffisamment long (30 ms) (Rugg, 1993). En effet, les différences significatives très ponctuelles ne correspondent pas à de véritables divergences de traitement cognitif. Les différences instables – valeur de *p* du test *t* inférieure à .05 durant moins de 30 ms – ne sont pas prises en compte (Rugg, 1993).

F. Synthèse

Le déroulement d'une expérience en Potentiels Evoqués peut être résumé selon le schéma suivant, du début de l'expérimentation à l'analyse des résultats (Figure 3.5).

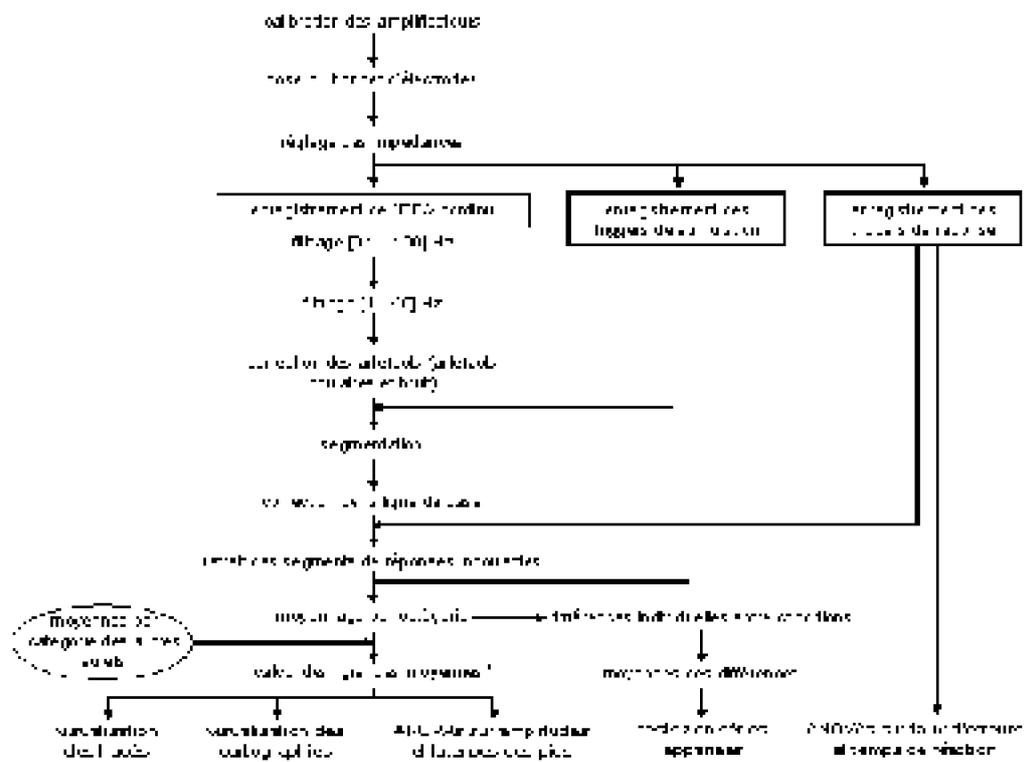


Figure 3.5 : Schéma de synthèse de la technique des Potentiels Evoqués. Procédures d'enregistrement et d'analyses.

Chap 4. Mise en évidence d'effets "top-down" lexicaux – Tâche d'identification de lettres

A. Introduction

A.1. Mise en évidence du lexique mental et des effets "top-down" lexicaux

La lecture experte a un certain nombre de particularités permettant de mettre en évidence l'existence d'un lexique mental qui facilite la reconnaissance des mots connus par effet "top-down" :

(1) Un lecteur expert parcourt un texte du regard en reconnaissant en moyenne 4.8 mots par seconde (Rayner and Pollatsek, 1989). Ce résultat de psychophysique ne peut s'expliquer si l'on ne tient compte que de l'acuité visuelle pour modéliser la lecture. Il semble donc nécessaire de faire intervenir le stockage de mots dans le lexique mental, dont l'influence s'ajoute à celle de l'acuité visuelle.

(2) Un adulte normo-lecteur peut rapidement identifier des mots malgré de grandes variations de paramètres tels que la position rétinienne, la taille, la couleur, la police ou la casse (Cohen and Dehaene, 2004; Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002; Dehaene et al., 2002; Dehaene et al., 2001). Même des formes de mots non familières, telles que "MiXeD cAsE", ne posent pas de difficultés majeures à notre système de reconnaissance visuelle de mots (Mayall, 2002; Mayall et al., 1997; Paap et al., 1984). Ainsi, la 'mémoire des mots' serait contenue dans un 'lexique mental' sous forme d'invariants, permettant la reconnaissance rapide d'un mot quelle que soit l'écriture utilisée.

(3) Certains auteurs ont mis en évidence une absence d'effet de longueur dans la lecture de mots : la reconnaissance visuelle d'un mot nécessiterait un temps constant, si celui-ci est formé de 3 à 6 lettres (Lavidor and Ellis, 2002). Les influences du lexique mental semblent donc pouvoir diminuer les effets de longueur dus à la diminution de l'acuité visuelle à distance de la fovéa.

(4) Enfin, la démonstration la plus évidente de l'aide lexicale au cours de la lecture est le phénomène du "Word Superiority Effect" : une lettre est plus facilement reconnue si elle est contenue dans un mot plutôt que dans un non-mot, ou si elle est présentée isolément (McClelland, 1979; McClelland and Rumelhart, 1981; Proverbio et al., 2004; Reicher, 1969) (voir chapitre 3 ; paragraphe A.2). Le contexte lexical d'une lettre facilite sa reconnaissance, ce qui démontre l'existence d'une influence lexicale de haut niveau.

Ces différentes observations laissent supposer que la reconnaissance visuelle d'un mot se fait en interaction avec une représentation abstraite et invariante du stimulus, stockée en mémoire : la "forme visuelle du mot" (ou "visual word form") (Caramazza and Hillis, 1990; Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002; Dehaene et al., 2002; McCandliss et al., 2003; Molko et al., 2002; Warrington and Shallice, 1980). Ces "visual word forms" seraient stockées dans un hypothétique lexique mental. La reconnaissance ultérieure d'un même mot serait facilitée et accélérée – par effet "top-down" – grâce à l'intervention de sa forme abstraite stockée en mémoire.

A.2. Le "Word Superiority Effect"

Le phénomène comportemental mettant le plus clairement en évidence les effets "top-down" lexicaux est le "Word Superiority Effect" (WSE). Les premières observations de ce phénomène particulier datent de 1886 (Cattell, 1886). Cattell observait à l'époque qu'un sujet normo-lecteur est capable de rapporter plus de lettres comprises dans un mot présenté brièvement que dans un non-mot³⁴. Dans la seconde moitié du XX^e siècle, Reicher (Reicher, 1969) et Wheeler (Wheeler, 1970) réutilisèrent le paradigme de Cattell avec certaines améliorations méthodologiques³⁵ et obtinrent un effet inattendu : une lettre est mieux reconnue lorsqu'elle est contenue dans un mot que lorsqu'elle est présentée isolément. Depuis, de nombreuses études psychophysiques ont reproduit cet effet de supériorité du mot, que le contrôle soit une lettre isolée, un pseudo-mot ou un non-mot (Grainger et al., 2003; McClelland, 1976; Proverbio et al., 2004).

³⁴ Un non-mot est une chaîne de caractères linguistiques imprononçable ('SDHPT' par exemple) alors qu'un pseudo-mot est une chaîne de caractères prononçable mais sans signification dans la langue étudiée ('MACLE' par exemple).

Aujourd'hui, le terme WSE fait référence à deux phénomènes différents, observés lors de présentations tachistoscopiques de mots ou de lettres suivies d'un masque (paradigme de Reicher-Wheeler) :

(1) Il est plus facile d'identifier une lettre présentée dans un mot plutôt que dans un pseudo-mot ou un non-mot (Adams, 1979; Fine, 2001; Juola et al., 1974; Manelis, 1974; McClelland and Johnston, 1977; Prinzmetal, 1992; Spoehr and Smith, 1975). Hildebrandt et al. (Hildebrandt et al., 1995) définissent ce phénomène comme le "*lexicality effect*".

(2) Les sujets normo-lecteurs identifient mieux une lettre lorsqu'elle est comprise dans un mot que lorsqu'elle est présentée isolément (Reicher, 1969; Wheeler, 1970). Hildebrandt et al. (Hildebrandt et al., 1995) parlent alors de "*word-letter effect*".

A.3. "Word Superiority Effect" et modélisation

En se basant sur le modèle IAM (présenté dans le chapitre 1 ; paragraphe D.3.b), une première hypothèse peut rendre compte du WSE : McClelland & Rumelhart (McClelland and Rumelhart, 1981) proposent qu'il y ait un "feedback" du niveau de représentation des mots à celui des lettres. L'activation d'une unité "mot" induirait le renforcement de l'activation des unités "lettres" le composant.

La deuxième hypothèse pouvant expliquer le WSE est basée sur le modèle d'activation en cascade de McClelland (McClelland, 1979) : une activation à un haut niveau de représentation (niveau de traitement des mots) pourrait se développer plus rapidement que le traitement à un plus bas niveau (niveau de traitement des lettres). Cette seconde hypothèse a été reprise plus tard par Grainger & Jacobs dans le "*Dual read-out model of word context effects on letter perception*" (Grainger and Jacobs, 1994). Selon ce modèle, une lettre pourrait être identifiée grâce à deux mécanismes différents : une identification directe grâce à une activation des représentations des lettres (letter read-out) ou une identification par déduction après identification du mot (word read-out). Le WSE s'expliquerait alors par l'avantage que représenterait le mécanisme de "word read-out" quand l'identification des lettres est difficile (e.g. temps de présentation bref), ce mécanisme étant inexploitable dans un contexte de non-mot.

B. Etude en Potentiels Evoqués des effets "top-down" lexicaux chez des adultes normo-lecteurs

³⁵ Dans le paradigme expérimental de Reicher-Wheeler, (1) la reconnaissance de la lettre se fait par choix forcé entre deux lettres proposées, pour éviter toute influence de la mémoire de travail dans la tâche. (2) De plus, chaque lettre alternative proposée est susceptible de former un mot (par exemple, lorsque le sujet doit identifier le "T" de "TABLE", les deux lettres qui lui sont proposées sont "T" et "C", la lettre "C" pouvant former le mot "CABLE"). Ainsi, la reconnaissance de la lettre ne peut se faire par déduction après identification incomplète du mot.

B.1. Présentation de l'étude

Afin d'étudier la dynamique des effets "top-down" lexicaux sur la reconnaissance de mots isolés, nous avons testé l'"effet de supériorité du mot" en Potentiels Evoqués. Pour tester le WSE, nous avons utilisé le paradigme de Reicher-Wheeler d'identification de lettres à choix forcé (Reicher, 1969; Wheeler, 1970) : nous avons comparé la course temporelle des événements électrophysiologiques induits par l'identification d'une lettre dans un mot ou un non-mot.

B.2. Hypothèses

Nous avons basé notre étude sur le modèle IAM de McClelland et Rumelhart (McClelland and Rumelhart, 1981) (voir chapitre 1, paragraphe D.3.b pour une description du modèle). Si l'on se base sur les différentes hypothèses formulées pour intégrer les effets "Top-down" lexicaux à ce modèle, il est probable que ces effets prennent place au niveau pré-lexical (traitement des lettres). Par ailleurs, différentes études de PE suggèrent que les modulations électrophysiologiques dues au traitement pré-lexical sont enregistrées dans la fenêtre temporelle de [140 – 190] ms, au niveau de l'onde N170 (Bentin et al., 1999; Cornelissen et al., 2003) (voir chapitre 1 ; paragraphe E.6.b pour une revue de la littérature). Nous avons donc émis l'hypothèse que les effets "Top-down" lexicaux mis en place dans la reconnaissance de lettre en contexte 'Mot' allaient entraîner une modulation de la N170. Nous avons par ailleurs testé l'influence du temps de présentation des séquences linguistiques sur l'identification de lettres (effet "Bottom-up"), puisque ce paramètre a probablement une incidence importante sur les substrats neuronaux de la lecture (voir (Price et al., 1994)).

Nous pouvons résumer notre hypothèse principale en se basant sur le schéma de synthèse de notre problématique générale de travail (voir chapitre 3 ; paragraphe A.1), présenté figure 4.1 :

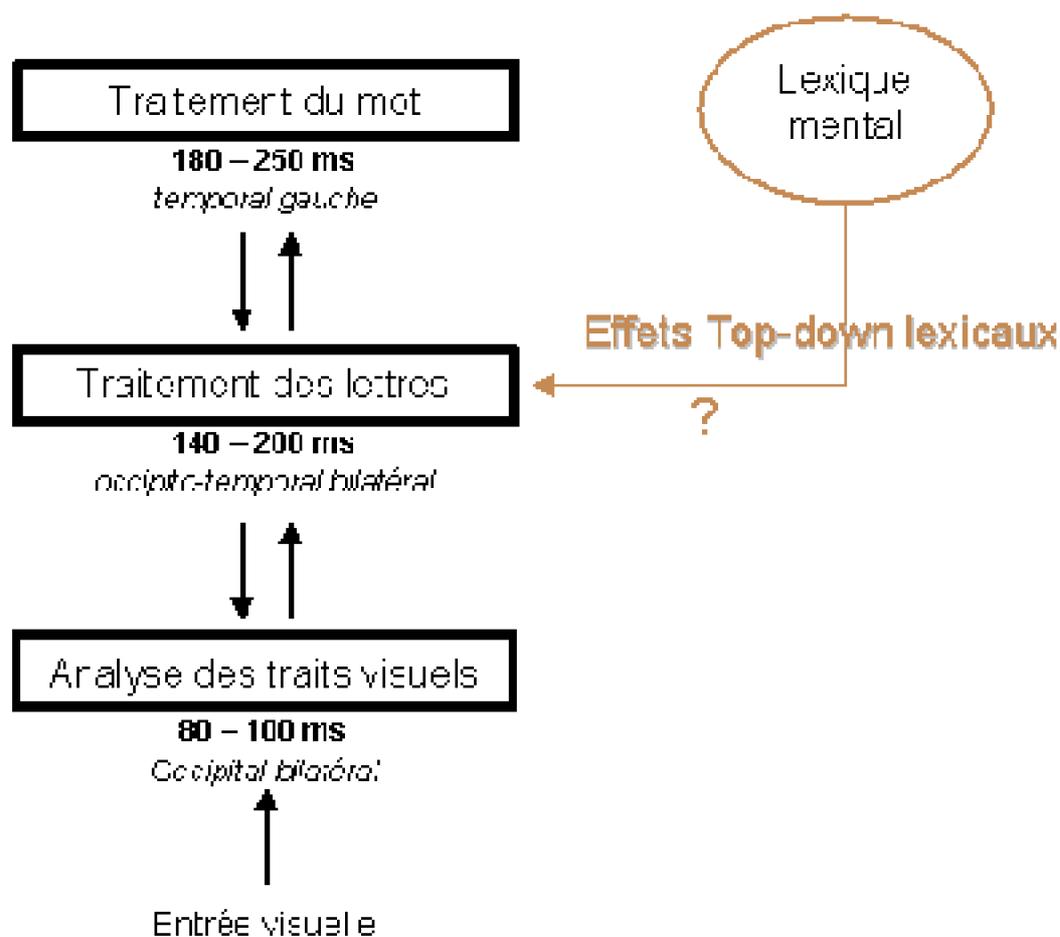


Figure 4.1 : Schéma de l'hypothèse principale proposée dans l'étude de l'identification de lettres à choix forcé.

B.3. Matériel et Méthode

Dix sujets de langue maternelle française ont passé cette expérience (5 hommes et 5 femmes, d'un âge moyen de 24.8 ans \pm 1.6, tous droitiers). Chaque sujet a donné préalablement son consentement éclairé pour participer à un protocole de recherche sans bénéfice individuel direct. Ce protocole avait été validé par un comité d'éthique local et assuré par l'INSERM. Tous les sujets avaient par ailleurs une vue normale ou corrigée à la normale.

B.3.b. Stimuli

Les stimuli sont une liste de 40 mots et 40 non-mots (voir annexe 4.1). Nous avons choisi les contextes de 'Mot' et de 'Non-mot' afin d'obtenir un effet de supériorité du mot maximal. Les 40 mots de haute fréquence lexicale (Log_{10} [fréquence moyenne] = 4.35 ; intervalle de 3.14 à 5.08) ont été sélectionnés dans la base de données Brulex (Content, 1990). Les non-mots sont des séquences de consonnes imprononçables, dont les

fréquences de digraphes sont très faibles (\log_{10} [fréquence moyenne] = 1). Tous les mots (ex. 'salon') et non-mots (ex. 'hgmcp') sont de 5 lettres. Le choix des mots a été contraint par le paradigme de Reicher-Wheeler : les noms sélectionnés ont un voisin orthographique, de fréquence lexicale proche, et qui ne diffère que d'une lettre (ex. 'salon' / 'savon'). L'emplacement de cette lettre différenciant les deux voisins orthographiques sera systématiquement celui de la lettre cible. Cinq listes de huit noms ont été générées, correspondant aux 5 positions de lettre-cible.

B.3.c. Tâche et procédure

Au début de chaque essai, une croix de fixation est affichée en position centrale sur un écran d'ordinateur durant 2.5 secondes. La croix de fixation disparaît 50 ms, puis réapparaît durant 200 ms (cette technique d'affichage permet de refocaliser l'attention du sujet sur la croix de fixation juste avant l'apparition du stimulus). Après un écran blanc de 50 ms, un stimulus (mot ou non-mot) est affiché 50 ou 66 ms ("Times New Roman", minuscules, taille 28). Les stimuli sont systématiquement centrés sur leur lettre-cible, c'est-à-dire sur la lettre que le sujet aura à identifier : la croix de fixation (donc le point de regard du sujet) est toujours centrée, et la position des stimuli varie sur un axe horizontal (Figure 4.2). Les stimuli sont projetés selon un angle visuel maximal de 6.65° , à une distance de 60 cm des sujets. Après 50 ou 66 ms, le stimulus est remplacé par un masque (chaîne de 7 lettres 'x' majuscules ; voir figure 4.2) recouvrant la totalité de la séquence de lettres, ainsi que deux lettres au choix, l'une au-dessus et l'autre en-dessous de la position occupée précédemment par la lettre cible. Les sujets doivent décider laquelle des deux lettres proposées est la lettre cible précédemment affichée au niveau de la position du regard. La réponse est donnée à l'aide de deux boutons 'haut' et 'bas' d'un boîtier de réponse. Le masque et les deux lettres au choix restent affichés à l'écran jusqu'à ce que le sujet donne sa réponse. Chacun des 40 mots et non-mots est présenté une fois 50 ms, une fois 66 ms, et répété 6 fois au cours de l'expérience. Un total de 960 essais est ainsi présenté au sujet, en 12 blocs de 80 items distribués aléatoirement. L'ordre de passation des blocs et les mains de réponse sont contrebalancés entre les participants.

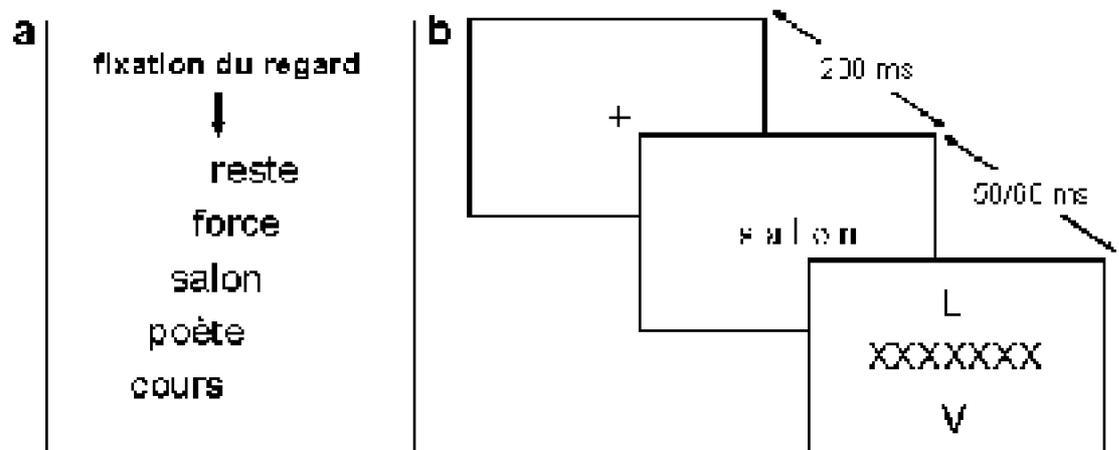


Figure 4.2 : a. Différentes localisations possibles d'un stimulus à l'écran, avec un point de

fixation du regard stable. Un stimulus est centré sur sa première, seconde, troisième, quatrième ou cinquième lettre par rapport à la croix de fixation. b. Design expérimental de la tâche d'identification de lettres à choix forcé.

B.3.d. Acquisition et traitement des Potentiels Evoqués

Les sujets sont confortablement assis dans une pièce insonorisée, et reçoivent la consigne de bouger et cligner des yeux le moins possible. Les données électrophysiologiques sont enregistrées grâce à 64 électrodes Ag/AgCl reliées à des amplificateurs SynAmpsTM (NeuroscanTM, El Paso, TX, USA), à une fréquence d'échantillonnage de 500 Hz. L'électro-oculogramme est enregistré simultanément, à l'aide de deux électrodes supra- et infra-orbitales. Le signal est filtré en ligne entre 0.1 et 100 Hz. Les impédances sont maintenues tout au long de l'enregistrement à des valeurs inférieures à 20 kOhms. Les enregistrements continus sont ensuite filtrés 'off-line' avec un filtre passe-bande de [1 – 40] Hz. Les artefacts oculaires sont retirés du signal à l'aide d'un algorithme de correction, et les autres portions bruitées observées sur les tracés sont retirées manuellement de l'enregistrement. Un découpage du signal continu est ensuite réalisé dans la fenêtre temporelle [-100 – 1700] ms autour de chaque "trigger" de stimulation. Une correction de la ligne de base relative à l'activité pré-stimulation est appliquée à chaque segment. Sur les 48 segments par condition existant pour chaque sujet, ceux correspondant à des réponses fausses sont rejetés. Les segments restant sont moyennés afin d'obtenir les moyennes individuelles par condition. Les différences individuelles entre conditions et les "grandes moyennes" sont alors calculées à partir des tracés de PE individuels (pour plus de détail sur chaque étape de traitement, voir chapitre 3 ; paragraphes C.2 et C.3).

B.3.e. Analyses statistiques

Les résultats comportementaux (taux d'erreurs et temps de réaction) sont comparés entre conditions à l'aide d'une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA), afin d'estimer les effets principaux (lexicalité et temps de présentation) et les possibles interactions entre ces facteurs. Afin de corriger les éventuelles violations de sphéricité, une *correction de Greenhouse-Geisser* a été appliquée aux statistiques (Greenhouse and Geisser, 1959).

Une recherche automatique des principaux pics de potentiels a été réalisée dans les intervalles de temps définis sur la "Mean Global Field Power" des 64 électrodes (Picton et al., 2000). Les intervalles de recherche sont [70 – 130] ms pour la P1, [150 – 240] ms pour la N1, [240 – 300] pour la N_{Left} et [180 – 260] ms pour la P300. Les amplitudes moyennes et les latences des pics sont analysées, par ANOVA à mesures répétées, au niveau des électrodes de sensibilité maximale. L'analyse est faite sur les électrodes O1, P5, PO3, PO7, O2, P6, PO4, PO8 pour la P1 et la N1 ; CP5, P5, P7, TP7, CP6, P6, P8, TP8 pour la N_{Left} ; F1, FC1, Fz, FCz, F2, FC2 pour la P300. Les facteurs de l'ANOVA sont la lexicalité (contexte Mot ou Non-mot), le temps de présentation (50 ou 66 ms) et l'hémisphère³⁶ (Gauche ou Droit).

Les fenêtres temporelles de différences significatives entre conditions ont été estimées à l'aide de tests *t* en séries appariées pour les contrastes d'intérêt (par exemple,

Mot *versus* Non-mot dans chaque hémisphère). Les différences instables (valeur de p inférieure ou égale à .05 durant moins de 30 ms) n'ont pas été prises en compte (Rugg, 1993). (pour plus de détail sur les statistiques, voir chapitre 3 ; paragraphes C.4).

Nous allons à présent décrire les résultats obtenus grâce à deux analyses différentes des données obtenues : une première analyse (paragraphe C.) a été faite en ne tenant pas compte du facteur de position des lettres dans la séquence, i.e. en moyennant systématiquement les résultats obtenus pour les positions de lettres 1, 2, 3, 4 et 5 au sein d'une même condition. Cette étude porte donc sur la comparaison des effets de lexicalité et de temps de présentation.

Dans un deuxième temps (paragraphe D.), les différentes positions de lettres seront prises en compte pour affiner les premiers résultats obtenus.

C. Etude des effets "Top-down" lexicaux toutes positions de lettres confondues

C.1. Résultats

C.1.a. Résultats comportementaux

Les résultats comportementaux sont représentés sur la figure 4.3. Les taux d'erreurs sont significativement plus faibles pour une identification de lettre dans un mot (taux d'erreur moyen = 14% \pm 18) que dans un non-mot (taux d'erreur moyen = 31% \pm 13) : l'effet de lexicalité sur les taux d'erreurs est significatif ($F[1, 9] = 15.46, p = .003$). Les taux d'erreur sont aussi plus faibles à 66 ms de temps de présentation (TP) qu'à 50 ms ($F[1, 9] = 15.5, p = .003$). Les deux facteurs (lexicalité et TP) n'interagissent pas.

Les temps de réaction (TR) sont significativement plus courts dans le contexte Mot (TR moyen = 647ms \pm 173) que dans le contexte Non-mot (TR moyen = 735ms \pm 213) : l'effet de lexicalité sur les TR est significatif ($F[1, 9] = 8.5, p = .017$). Le facteur TP n'affecte pas significativement les TR, et il n'y a pas d'interaction lexicalité/TP.

³⁶ Le facteur hémisphérique correspond à l'hémisphère d'enregistrement, afin de définir si les pics observés sont bilatéraux ou latéralisés. Il ne s'agit pas d'hémisphère de stimulation (information visuelle envoyée à l'hémisphère gauche ou droit), puisque tous les stimuli de l'expérience sont présentés en vision fovéale.

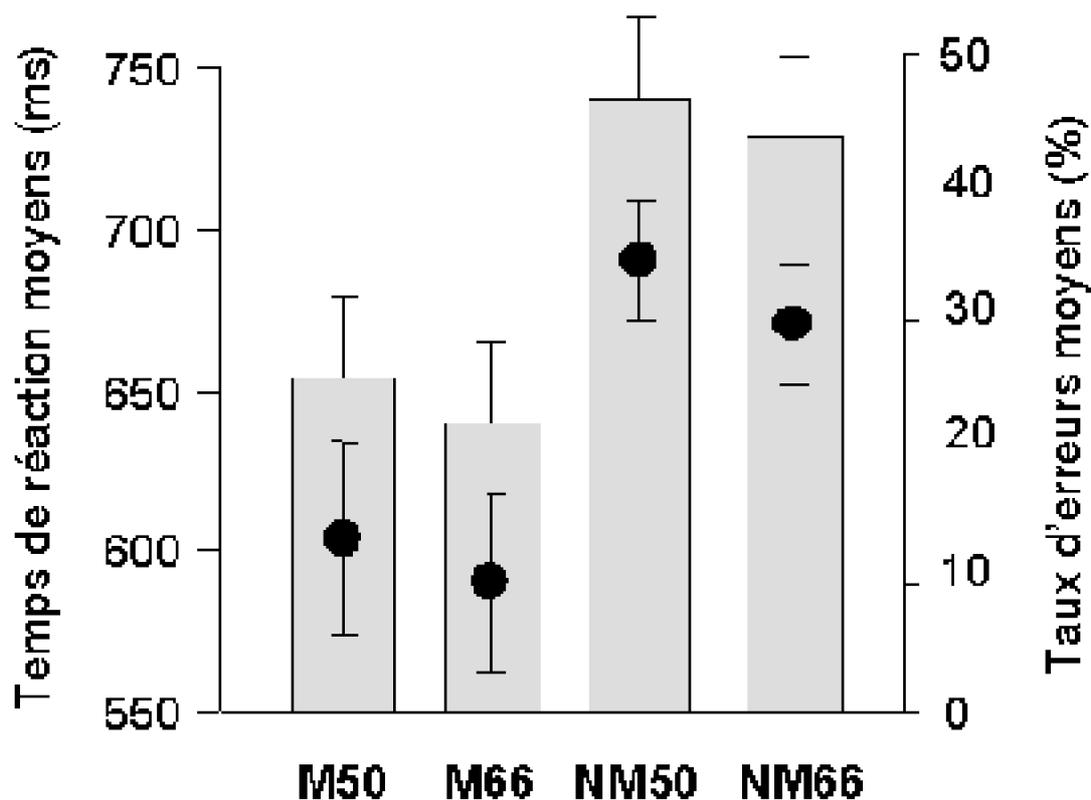


Figure 4.3 : Résultats comportementaux. M50 correspond à la condition 'Mots' présentés 50 ms ; M66 correspond à la condition 'Mots' présentés 66 ms ; NM50 correspond à la condition 'Non-mots' présentés 50 ms ; NM66 correspond à la condition 'Non-mots' présentés 66 ms. Les histogrammes représentent les temps de réaction moyens et les cercles indiquent les taux d'erreurs moyens. Les barres d'erreurs indiquent les erreurs standard.

C.1.b. Potentiels Evoqués

Sur la figure 4.4a sont représentées les 9 régions d'intérêt définies pour l'étude des événements électrophysiologiques. Chaque région comprend 5 électrodes d'enregistrement, dont les tracés sont moyennés pour former un tracé moyen. Les tracés moyens des 9 régions d'intérêt sont présentés dans la figure 4.4b.

Trois événements majeurs sont observés dans les régions pariéto-occipitales (événements P1, P1' et N1 ; cf. flèches rouges sur la figure 4.4b), auxquels s'ajoute un événement fronto-central (P300 ; cf. flèches bleues). De plus, des divergences de tracés de potentiels entre les régions temporales gauche et droite sont observées en comparant les deux contextes lexicaux (dans la fenêtre temporelle [240 – 300] ms ; cf. flèches vertes). Ces différentes observations sont faites pour 50 et 66 ms de temps de présentation (Figure 4.4b).

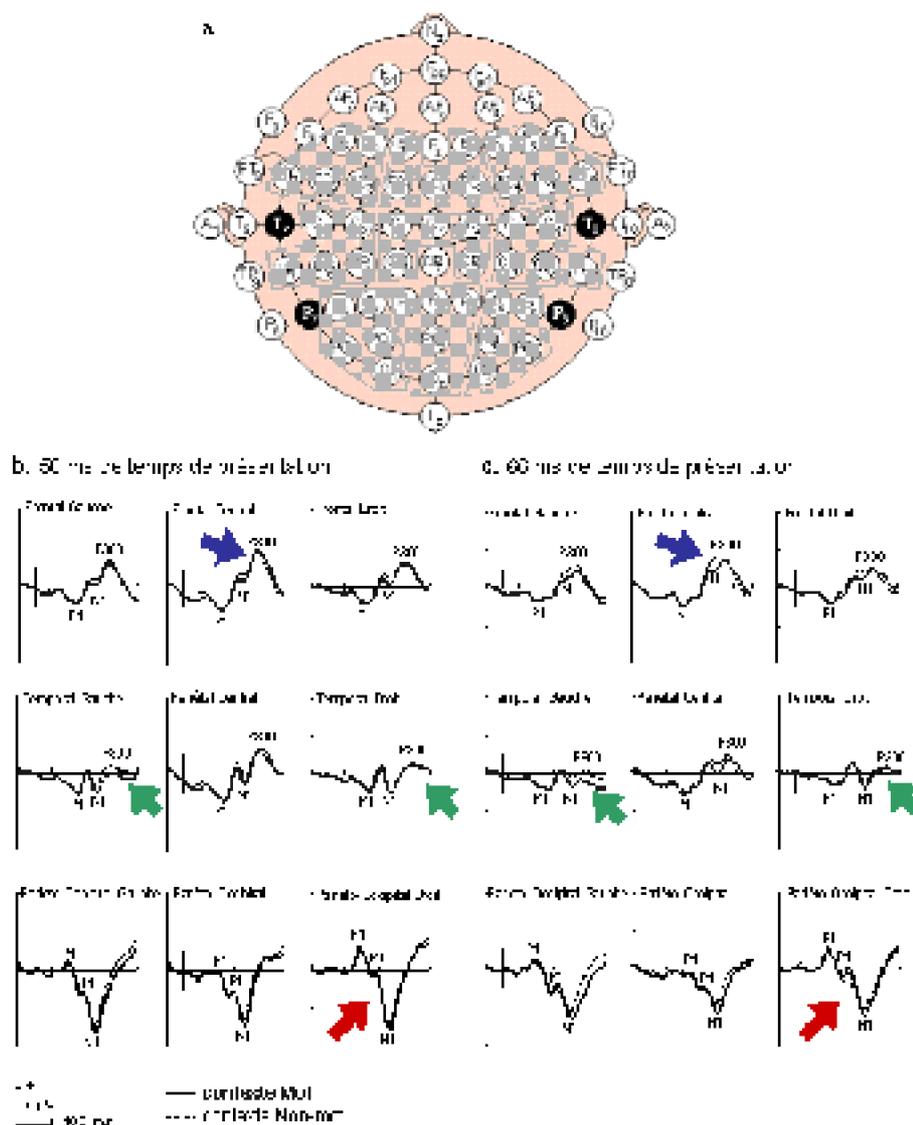


Figure 4.4 : Résultats de Potentiels Evoqués pour 9 régions principales du scalp (Frontal Gauche ; Frontal Central ; Frontal Droit ; Temporal Gauche ; Pariétal Central ; Temporal Droit ; Pariéto-Occipital Gauche ; Pariéto-Occipital ; Pariéto-Occipital Droit). a. Délimitation des 9 régions d'intérêt. b. Temps de présentation des stimuli de 50 ms. c. Temps de présentation de 66 ms. Comparaison, pour chaque région du scalp, des contextes Mot (trait plein) et Non-mot (pointillés). Dans les deux conditions de temps de présentation, 4 pics principaux sont observés (P1, P1', N1 et P300) pour les deux conditions de lexicalité.

Evènement P1

Le premier évènement (P1) a une latence moyenne de 99 ± 13 ms. Ce pic est significativement plus ample dans la région pariéto-occipitale droite que gauche. Sa latence et son amplitude moyenne ne sont affectées ni par la lexicalité ni par le TP, comme l'indiquent les résultats statistiques répertoriés dans le tableau ci-dessous (voir aussi le pic P1 sur la figure 4.5).

P1	Latence	Amplitude moyenne
<i>effet de lexicalité</i>	F[1,9] = .61; p = .455	F[1,9] = 1.48; p = .254
<i>effet de TP</i>	F[1,9] = .03; p = .861	F[1,9] = 4.12; p = .073
<i>effet d'hémisphère</i>	aucun résultat ³⁷	F[1,9] = 5.45; p = .044

Evènement P1'

Nous avons interprété l'évènement P1' comme l'équivalent de la P1, induit non plus par le stimulus mais par le masque. Cette interprétation a été guidée par les effets de décalage chronométrique observés entre les deux conditions de temps de présentation, avec un décalage dans le temps pour le TP de 66 ms : 136 ±6 ms en moyenne pour un TP de 50 ms ; 144 ±12 ms en moyenne pour un TP de 66 ms. Nous n'étudierons pas cet évènement dans le détail, puisque nous ne travaillons que sur les différents effets induits directement par la stimulation.

Evènement N1

L'évènement N1 apparaît à 184 ±15 ms en moyenne, pour un TP de 50 ms, et à 210 ±19 ms en moyenne pour un TP de 66 ms. Ce pic est significativement retardé et réduit pour 66 ms de TP par rapport à 50 ms de TP. Par contre, sa latence est indépendante de la lexicalité. Son amplitude moyenne ne dépend pas de la lexicalité, mais il existe une interaction significative entre lexicalité et TP (voir figure 4.5).

N1	Latence	Amplitude moyenne
<i>effet de lexicalité</i>	F[1,9] = 3.02; p = .12	F[1,9] = 2.96; p = .12
<i>effet de TP</i>	F[1,9] = 16.19; p = .003	F[1,9] = 13.78; p = .005
<i>effet d'hémisphère</i>	aucun résultat ⁴	F[1,9] = .03; p = .86
<i>Interaction lexicalité/TP</i>	F[1,9] = .29; p = .60	F[1,9] = 7.36; p = .02

Une analyse post-hoc (*test de Scheffé*) a été réalisée afin de préciser la nature de l'interaction entre lexicalité et TP sur l'amplitude moyenne du pic N1 : pour un TP de 50 ms, l'effet de lexicalité n'est pas significatif ($p = 1.0$). Il est significatif uniquement pour un TP de 66 ms ($p = .003$).

Un test *t* en séries appariées vient compléter les résultats sur l'effet de TP : dans la région pariéto-occipitale gauche, les conditions de TP à 50 et 66 ms (toutes lexicalités confondues) diffèrent significativement dans les intervalles de temps [156 – 190] et [202 – 278] ms. Dans la région pariéto-occipitale droite, les deux conditions de TP diffèrent significativement dans les intervalles de temps [148 – 190] et [204 – 286] ms.

Un autre test *t* a été réalisé pour compléter les résultats sur l'effet de lexicalité : Les

³⁷ La latence d'un pic est définie au niveau d'une électrode de référence, puis appliquée à toutes les électrodes (pour plus de détail sur cette technique, voir le chapitre 3 ; paragraphe C.4.a). Ainsi, aucun effet d'hémisphère ne peut être mesuré sur les latences des pics, ces latences étant identiques pour chacune des 64 électrodes.

tracés de PE induits par les contextes Mot et Non-mot pour un TP de 66 ms sont significativement divergents entre 200 et 306 ms dans la région pariéto-occipitale gauche, et entre 202 et 244 ms dans la région pariéto-occipitale droite (voir les barres grises sur la figure 4). Aucune différence significative entre les deux tracés n'est observée pour un TP de 50 ms.

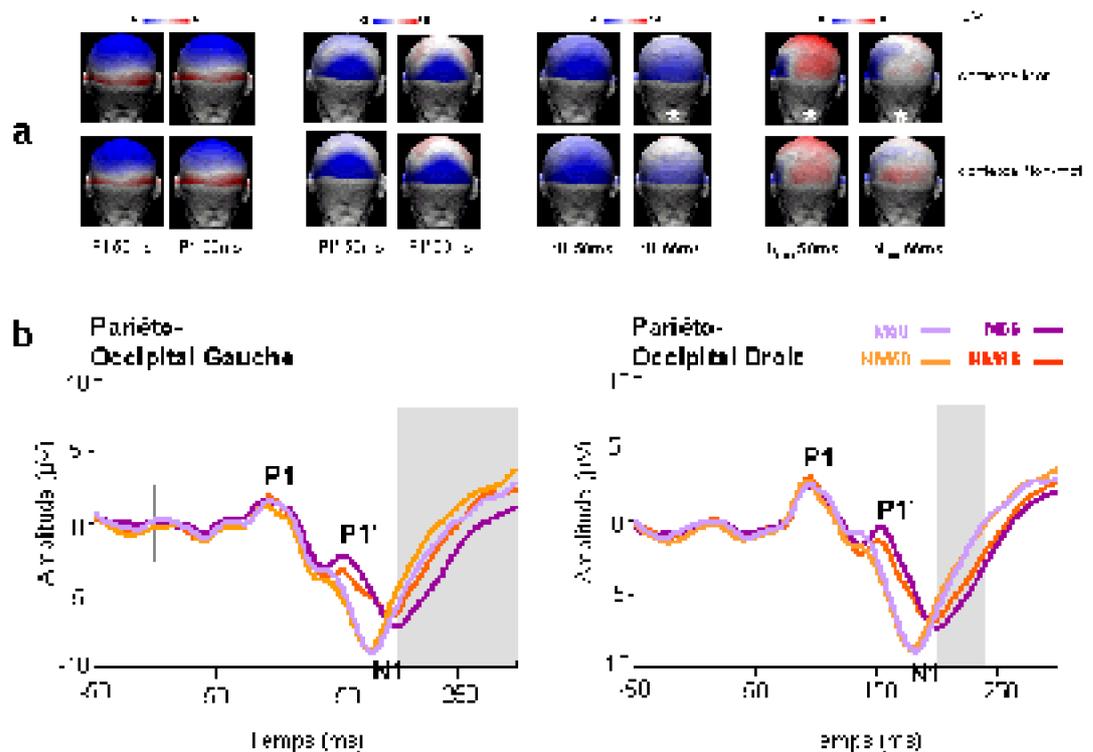


Figure 4.5 : **a.** Topographie des principaux événements observés, pour chaque TP, dans les contextes Mot et Non-mot. Les étoiles indiquent les zones de différences significatives en terme d'amplitude moyenne, entre les contextes Mot (ligne du haut) et Non-mot (ligne du bas). **b.** PE mesurés dans les régions pariéto-occipitales gauche et droite (dérivations linéaires des électrodes O1, P5, PO3, PO7 et O2, P6, PO4, PO8), pour les deux contextes lexicaux Mot et Non-mot et les deux TP. Les barres grises indiquent les intervalles de significativité du test *t* entre les contextes Mot et Non-mot, sur les dérivations linéaires droite et gauche.

Evènement N_{Left}

Dans la fenêtre temporelle [240 – 300] ms, les PE induits par l'identification de lettre en contexte 'Mot' sont significativement plus amples qu'en contexte 'Non-mot', au niveau des électrodes temporo-pariétales gauches (voir les régions indiquées par des flèches vertes sur la figure 4.4, et les cartographies de la N_{Left} sur la figure 4.5)³⁸.

N_{Left}	Amplitude moyenne
effet de lexicalité	F[1,9] = 9.30; p = .01
effet de TP	F[1,9] = 30.32; p = .0004
effet d'hémisphère	F[1,9] = 5.14; p = .04
Interaction lexicalité/TP	F[1,9] = 7.95; p = .02
Interaction lexicalité/hémisphère	F[1,9] = 21.58; p = .001

L'analyse post-hoc par test de Scheffé indique que les tracés diffèrent entre les contextes 'Mot' et 'Non-mot' dans l'hémisphère gauche (p = .0003) et pas dans l'hémisphère droit (p = .81). Par ailleurs, cette analyse révèle aussi que les PE divergent entre les hémisphères droit et gauche dans le contexte 'Mot' (p = .0002) mais pas dans le contexte 'Non-mot' (.60).

La comparaison des électrodes temporo-pariétales gauches et droites en contexte 'Mot' révèle, par test *t* en séries appariées, une différence significative de tracés dans l'intervalle [242 – 298] ms.

Evènement P300

La P300 est maximale dans la région fronto-centrale, aux latences indiquées dans le tableau suivant :

Latence de P300	TP 50 ms	TP 66 ms
contexte Mot	229 ±19 ms	217 ±29 ms
contexte Non-mot	217 ±25 ms	211 ±23 ms

La latence de la P300 est affectée par la lexicalité et le TP (onde plus précoce pour les non-mots et le TP de 66 ms), alors que son amplitude moyenne est indépendante de ces deux facteurs (figure 4.6)³⁹.

Figure 4.6 : PE mesurés dans la région fronto-centrale (dérivation linéaire des électrodes F1, FC1, Fz, FCz, F2, FC2), pour les deux contextes lexicaux Mot et Non-mot et les deux TP.

³⁸ Pour cet évènement (N_{Left}), les latences ne sont pas analysées par ANOVA, puisqu'il ne s'agit pas d'un pic bien défini, mais d'une déviation négative de potentiel.

³⁹ Les effets d'hémisphère ne sont pas testés pour l'évènement P300, puisque ce pic est maximal pour les électrodes centrales.

P300	Latence	Amplitude moyenne
effet de lexicalité	F[1,9] = 8.04; p = .02	F[1,9] = .62; p = .45
effet de TP	F[1,9] = 8.61; p = .02	F[1,9] = 2.40; p = .16
Interaction lexicalité/TP	F[1,9] = .76; p = .41	F[1,9] = 3.80; p = .08

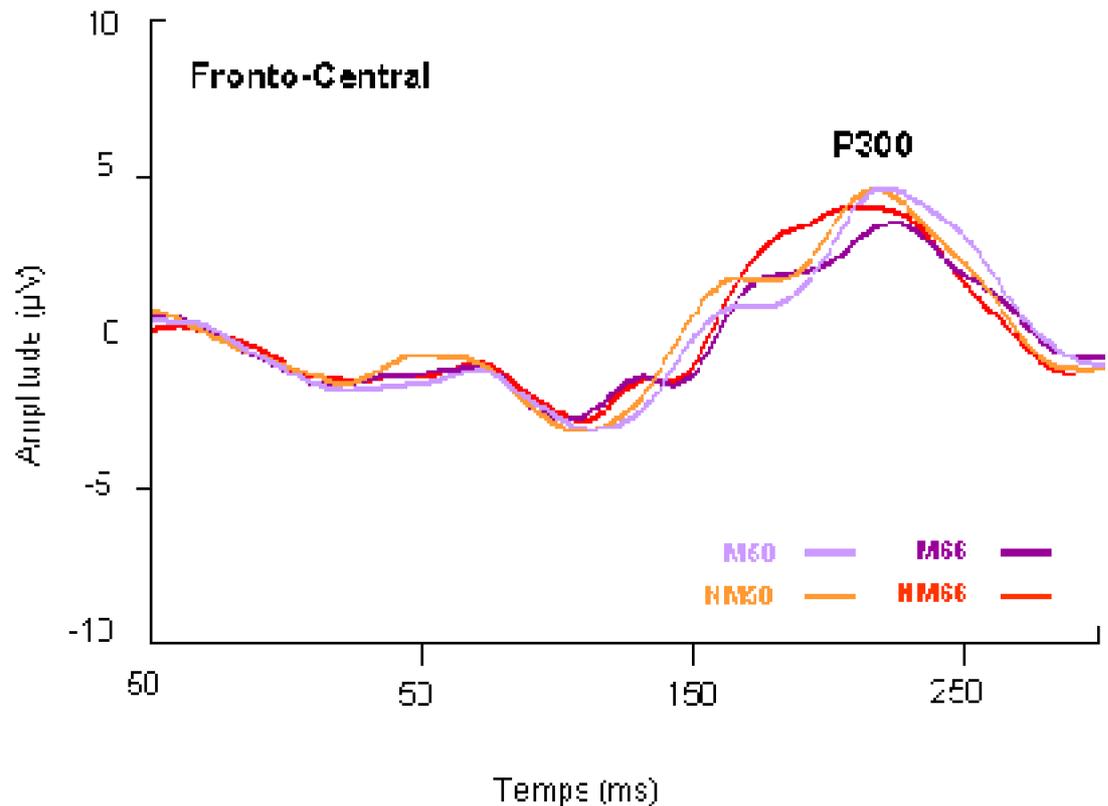


Figure 4.6 : PE mesurés dans la région fronto-centrale (dérivation linéaire des électrodes F1, FC1, Fz, FCz, F2, FC2), pour les deux contextes lexicaux Mot et Non-mot et les deux TP.

C.2. Discussion

C.2.a. Résultats comportementaux

Les sujets normo-lecteurs identifient significativement mieux et plus vite une lettre contenue dans un mot plutôt que dans un non-mot. Ces résultats sont en accord avec les précédentes études comportementales réalisées avec le paradigme de Reicher-Wheeler, et reproduisent l'effet de supériorité du mot (Proverbio et al., 2004; Reicher, 1969).

Les taux d'erreurs observés dans cette expérience (0.14 et 0.31 pour une détection de lettre dans un mot ou dans un non-mot, respectivement) sont similaires à ceux rapportés par McClelland (0.15 et 0.30 pour les mêmes conditions ; voir (McClelland,

1976)) et Grainger (0.14 et 0.31 pour les mêmes conditions ; voir (Grainger et al., 2003)) dans leurs expériences testant le même paradigme.

Au vu des résultats comportementaux, il semble donc que notre paradigme expérimental réplique bien l'effet de supériorité du mot. Des effets "Top-down" lexicaux ont donc été mis en place au cours de la tâche, lors de la détection de lettre en contexte 'Mot'.

Par ailleurs, un temps de présentation des items plus long entraîne une diminution du taux d'erreurs. Ce résultat est tout à fait congruent avec le débriefing réalisé auprès de chaque sujet après la passation de l'expérience : le temps de présentation de 50 ms permet à peine aux sujets de voir la lettre à identifier, même en contexte 'Mot', et la tâche leur semble alors difficile. Pour les temps de présentation plus élevés, les sujets perçoivent mieux les items à l'écran et réalisent donc la tâche avec des taux de réussite significativement plus élevés.

C.2.b. Potentiels Evoqués

Evènement électrophysiologique précoce (P1)

L'évènement P1 identifié dans cette expérience est indépendant du contexte lexical, en latence et en amplitude. La latence et la topographie de cet évènement sont similaires à celles décrites précédemment dans la littérature (Cornelissen et al., 2003; Rossion et al., 2003; Sereno et al., 2003). L'absence de tout effet de lexicalité à ce stade est congruente avec le fait que la discrimination entre mots et non-mots (Simon et al., 2004) ou entre séquences linguistiques et non linguistiques (Rossion et al., 2003) n'affecte pas les PE dans les 150 premières ms suivant la présentation du stimulus.

En plus d'être indépendante de la catégorie lexicale du stimulus, la P1 est indépendante de son temps de présentation. Cet évènement semble donc bien être le témoin d'un traitement visuel 'primaire'. Il peut varier entre des stimuli visuellement très différents (mots, visages, images de voitures ; voir (Rossion et al., 2003)) mais demeure indépendant de variations fines au sein d'une même catégorie.

L'évènement P1 est uniquement dépendant, dans notre expérience, du facteur hémisphérique : il est plus ample au niveau de l'hémisphère droit, ce qui a déjà été observé par Kutas et al. (Kutas et al., 1988).

Evènement N1 et effets "Top-down" lexicaux

Le postulat de départ de notre étude est qu'une meilleure performance dans l'identification de lettres dans un mot *versus* non-mot peut être expliquée par l'intervention de processus "Top-down", dans le sens où l'information lexicale d'un mot en mémoire augmente le niveau d'activation de toutes les lettres de ce mot. Cette différence de performance entre les contextes lexicaux a été observée au niveau des résultats comportementaux. Ces effets "Top-down" ont donc été mis en place au cours de la tâche, et seront mis en évidence au niveau des PE par la première divergence de traces entre les deux contextes. Il semble alors que la représentation d'un mot en mémoire influence

l'identification d'une de ses lettres approximativement 200 ms après présentation du stimulus, puisque les premières divergences significatives de traces entre les deux conditions 'Mot' et 'Non-mot' ont été observées au niveau du pic N1, à 200 ms, dans les régions occipitales bilatérales.

Nous avons stipulé dans la présentation des résultats que l'évènement P1' était un 'accident' dans le tracé de potentiels induit par l'apparition du masque dans le design expérimental. Or, ce pic induit un délai dans la latence du pic N1 (voir figures 4.4 et 4.5). En tenant compte de ce délai, la N1 peut être comparée à l'évènement N170 décrit dans la littérature (Bentin et al., 1999; Rossion et al., 2003) (voir aussi la M170 décrite dans les résultats de MEG (Stockall et al., 2004; Tarkiainen et al., 1999)).

Puisque la N170 est considérée comme reflétant le traitement pré-lexical d'une séquence de lettres (Bentin et al., 1999; Cornelissen et al., 2003) (voir chapitre 1 ; paragraphe E.6.b), nos résultats suggèrent que les représentations lexicales en mémoire influencent l'identification de lettres à un niveau pré-lexical. Différents auteurs proposent que l'onde N1 reflète une activité neuronale dans le cortex extra-strié (Kuriki et al., 1998; Proverbio and Zani, 2003). Ainsi, nous supposons que les effets "Top-down" lexicaux influencent l'activité neuronale dans les aires extra-striées, ce qui est congruent avec les résultats d'études antérieures (Dolan et al., 1997; Frith and Dolan, 1997).

Sauseng et al., à l'aide d'un autre type de paradigme expérimental, mettent en évidence des effets "Top-down" lexicaux sur le traitement de séquences de lettres 160 ms après présentation des stimuli (Sauseng et al., 2004). L'utilisation, dans notre expérience, d'un masquage et de temps de présentation des stimuli très courts a pu entraîner un délai dans l'apparition des différences de traitement entre les contextes lexicaux. Ceci pourrait expliquer la différence de 40 ms obtenue entre les deux études.

Quelle que soit la latence des différences de traitement entre les deux contextes, les deux études sont en accord pour situer les effets "Top-down" lexicaux au niveau du traitement pré-lexical des séquences de lettres.

De nombreuses concordances avec les données de la littérature nous incitent à penser que l'onde N1 observée dans cette étude reflète un traitement pré-lexical, influencé par des effets "Top-down" lexicaux. Nous ne pouvons pourtant pas exclure l'hypothèse de Sereno et al. (Sereno et al., 2003; Sereno et al., 1998), supportée par les résultats de Balota et al. (Balota, 1990), selon laquelle l'onde N1 refléterait un traitement lexical plutôt que pré-lexical. En effet, bien que la tâche de cette expérience soit d'identifier des lettres, il est possible que les sujets traitent implicitement les séquences de lettres, traitement entraînant un accès au lexique pour les mots et pas pour les non-mots. Cette différence de traitement lexical serait reflétée par la variation significative d'amplitude entre les ondes N1 des deux conditions. L'onde N_{Left} ne serait alors que le prolongement dans le temps, au niveau de l'hémisphère gauche, de l'onde N1 reflétant un traitement lexical.

Evènement N_{Left} et traitement lexical

Une dérive négative est observée dans la fenêtre temporelle [240 – 300] ms, dans la région temporale gauche, lors de l'identification de lettres en contexte 'Mot'. Cette

négativité n'est pas présente dans les régions homologues de l'hémisphère droit. Elle n'est observée dans aucun des deux hémisphères, en contexte 'Non-mot'. Cette onde négative semble refléter la phase lexicale du traitement d'une séquence de lettres, permettant de différencier les mots des non-mots. Une telle différence hémisphérique a été observée par différents auteurs comparant les traitements de mots et de non-mots (Cohen et al., 2000; Pammer et al., 2004) (voir chapitre 1 ; paragraphe E.6.c). Cohen et al., en particulier, attribuent ces différences à une implication préférentielle du gyrus fusiforme gauche à la reconnaissance des formes visuelles des mots (Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2003; McCandliss et al., 2003) (voir chapitre 1 ; paragraphe E.2.b sur le Traitement lexical).

Les différents résultats obtenus tendent à montrer que la N_{Left} peut être assimilée à l'onde N2 décrite précédemment dans la littérature. Mais nous devons tout de même noter qu'il pourrait s'agir d'un prolongement de la négativité après l'onde N1, dans l'hémisphère gauche, plutôt que d'une onde typique N2.

Par ailleurs, l'observation de cet événement N_{Left} suggère qu'un traitement lexical est opéré par les sujets réalisant l'expérience, bien que la tâche soit d'identifier une lettre et non une séquence de lettres. Ce résultat implique que le traitement des mots est automatique, même si la tâche ne le nécessite pas explicitement. Le débriefing de l'expérience met aussi en avant cette automaticité de la lecture, puisque la majorité des sujets rapportaient qu'ils avaient reconnu des mots au cours de la tâche, alors que la consigne leur indiquait clairement de ne pas essayer d'identifier la totalité de la séquence, mais bien uniquement la lettre cible.

Effets du temps de présentation des séquences de lettres

L'onde N1 est fortement dépendante du TP : (1) la N1 est significativement retardée de 26 ms environ quand le temps de présentation des stimuli passe de 50 à 66 ms. (2) De plus, la N1 est modulée en amplitude par le contexte lexical, uniquement pour un TP de 66 ms. Une explication possible à cette observation vient du modèle de Grainger & Jacobs (Grainger and Jacobs, 1994). Dans ce modèle, les effets "Top-down" lexicaux peuvent influencer l'identification de lettre au stade de traitement des lettres ou à celui de traitement des mots. Nous faisons l'hypothèse que seul le dernier stade est impliqué dans ces effets lorsque le TP est de 50 ms. Un temps de présentation plus long permet la mise en place de feedbacks dès le niveau de traitement des lettres :

(1) Pour un TP de 66 ms, les effets "Top-down" lexicaux influencent le processus dès le traitement des lettres, induisant des divergences de traces de la N1. Cette influence lexicale se prolonge durant le stade de traitement des séquences de lettres, induisant des variations de traces de la N_{Left} .

(2) Dans l'autre condition (TP de 50 ms), le temps de présentation est trop court pour permettre un feedback significatif au niveau du traitement des lettres. Les différences entre les contextes 'Mot' et 'Non-mot' ne seront alors basées que sur le niveau de traitement des séquences de lettres, et seront donc plus tardives (influence uniquement de la N_{Left}) (cf Figure 4.4 ; région temporelle gauche).

Selon cette hypothèse, les effets "Top-down" lexicaux auraient lieu pour les deux TP,

mais en étant plus 'efficaces' à 66 qu'à 50 ms. Ceci est congruent avec les résultats comportementaux, puisque l'on observe un effet de supériorité du mot dans les deux conditions de TP, mais que cet effet est significativement plus important pour un TP de 66 ms.

Évènement P300 et temps de catégorisation des stimuli

La P300 est plus précoce dans le contexte Non-mot que dans le contexte Mot. Elle est aussi plus précoce pour un TP de 66 ms que pour un TP de 50 ms. Or, la latence de la P300 reflète le temps de catégorisation du stimulus traité (Kutas et al., 1977; McCarthy and Donchin, 1981; Polich, 1986).

Ainsi, dans notre étude, il semble que les non-mots soient catégorisés plus rapidement que les mots. Ceci peut s'expliquer par le fait que les non-mots sont des séquences de consonnes, et ils sont donc aisément identifiables comme des séquences lexicalement non valides.

De plus, quel que soit le contexte lexical, les stimuli sont catégorisés plus rapidement s'ils ont été présentés plus longtemps. Cet effet peut s'expliquer, entre autre, par le fait que les effets "Top-down" facilitateurs sont plus importants pour un TP plus long. Si les effets "Top-down" lexicaux ont une influence plus grande, le temps de catégorisation est plus court.

En revanche, l'amplitude de la P300 reflète plutôt la charge attentionnelle allouée au traitement d'un stimulus. Dans cette tâche particulière, cette charge attentionnelle pourrait donc ne pas varier de manière importante en fonction de la lexicalité ou du TP des stimuli.

C.3. Conclusion

Les résultats de cette étude sont en accord avec le modèle IAM et les données temporelles associées, présentés dans les hypothèses (paragraphe B.2 de ce chapitre) : un premier niveau de traitement, indépendant de la lexicalité et du TP, est observé environ 100 ms après présentation des stimuli, et pourrait refléter l'analyse des traits visuels des stimuli. Le second stade de traitement, relatif au traitement pré-lexical, est reflété par une négativité pariéto-occipitale bilatérale, environ 200 ms après la stimulation. Cette onde N1 serait induite par l'extraction d'information sur la nature des lettres composant les séquences. Enfin, le traitement lexical semble correspondre à une négativité temporo-pariétale gauche, entre 240 et 300 ms après la présentation du stimulus. D'après nos résultats, nous proposons que les formes visuelles des mots stockées en mémoire peuvent influencer une tâche d'identification de lettres à un stade pré-lexical, i.e. durant l'extraction d'information sur les lettres, environ 200 ms après la présentation. Nos résultats indiquent aussi que cet effet "Top-down" facilitateur est dépendant du temps de présentation des stimuli. Les stades de traitement des mots et de catégorisation sont aussi influencés par la lexicalité et le TP des stimuli. A l'inverse, la charge attentionnelle est indépendante de ces deux facteurs.

Nous pouvons d'ores et déjà, avec ces résultats, compléter le schéma de nos hypothèses (voir la figure 4.7).

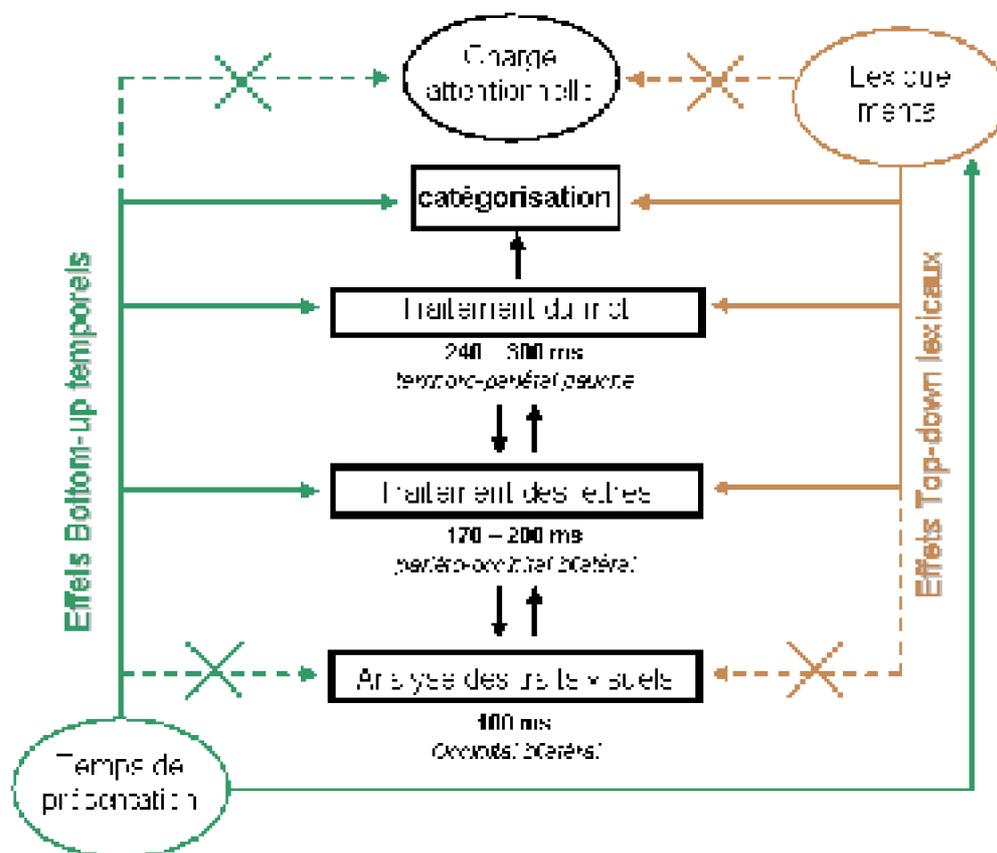


Figure 4.7 : Schéma de synthèse des principaux résultats obtenus dans l'étude sur les effets "top-down" lexicaux influençant l'identification de lettres.

Après avoir étudié la dynamique des effets "Top-down" lexicaux, nous allons maintenant tenter d'affiner les résultats obtenus : les effets lexicaux facilitateurs influencent l'identification d'une lettre au niveau de l'onde N1, mais cet effet est-il semblable quelle que soit la position dans la séquence de la lettre à identifier ? En d'autres termes, la modulation de la N1 est-elle identique que l'influence lexicale "Top-down" intervienne pour une identification de lettre en début (i.e. lorsque le regard est positionné sur la 1^{ère} lettre du mot ; Position 1), milieu (Position 3) ou fin de séquence (Position 5) ?

D. Effets "Top-down" lexicaux en fonction de la

position du regard

D.1. Résultats

D.1.a. Résultats comportementaux

Les résultats comportementaux de l'identification des lettres en fonction de leur position dans la séquence sont présentés dans la figure 4.8⁴⁰.

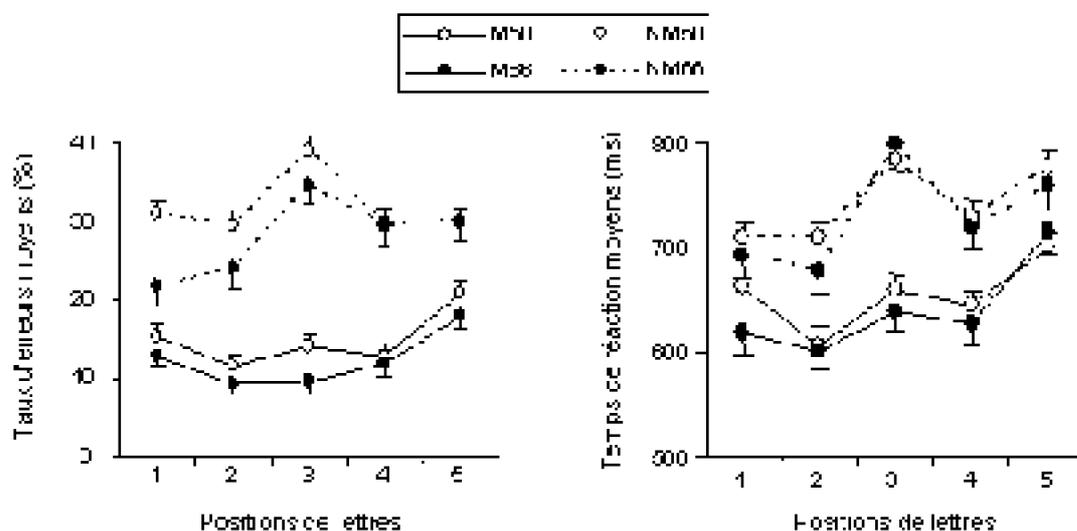


Figure 4.8 : Résultats comportementaux en fonction des 5 positions de lettres. **Gauche.** Taux d'erreurs moyens des sujets en fonction des positions de lettres, pour les 4 conditions principales de la tâche. **Droite.** Temps de réaction moyens en fonction des positions de lettres.

On retrouve les effets significatifs de lexicalité et de TP décrits précédemment (voir paragraphe C.1.a). Dans cette nouvelle analyse des résultats comportementaux, on observe en plus un effet de la position de la lettre dans la séquence ($F[2.25,20.25] = 4.81$; $p = .02$) ainsi qu'une interaction significative entre position et lexicalité ($F[2.75,24.79] = 5.96$; $p = .004$). Ainsi, les effets de lexicalité ne sont pas identiques d'une position de lettre à une autre.

Comme nous l'avons vu dans la première analyse de résultats, les temps de réponse sont influencés par la lexicalité mais pas par le TP. Cette nouvelle analyse apporte une information supplémentaire : la position dans la séquence de la lettre à identifier influence

⁴⁰ D'après le design expérimental (voir figure 1 ; paragraphe B.3.c), la lettre cible est toujours située sous la position du regard. Ainsi, nous parlerons indifféremment d'effet de position de regard ou d'effet de position de lettre dans la séquence.

significativement les TR ($F[1.69,15.22] = 6.97; p = .009$).

D.1.b. Potentiels Evoqués

L'effet de position et l'interaction position/lexicalité observés dans les résultats comportementaux indiquent que les effets de lexicalité ne sont pas équivalents entre les 5 positions de lettres. On peut voir sur le graphique de gauche de la figure 4.8 que l'effet de lexicalité est majeur pour la position 3 (écart maximal entre les taux d'erreurs en contexte 'Mot' ou 'Non-mot'). A l'inverse, cet effet est le plus faible pour les positions extrêmes 1 et 5.

Le but de cette analyse est d'évaluer l'incidence des effets "Top-down" lexicaux en fonction de la position de lettre dans la séquence. Ainsi, nous allons étudier les variations de PE par position de lettre, pour les positions 1, 3 et 5. La première analyse a révélé que les effets "Top-down" lexicaux induisaient des divergences de tracés de PE au niveau de l'amplitude de la N1, pour 66 ms de TP. Nous allons donc maintenant étudier les variations d'amplitude du pic N1 entre les deux contextes lexicaux, en fonction des positions de lettres 1, 3 et 5, pour un TP de 66 ms.

Evènement N1 (Comparaison de 3 positions de lettres)

Les effets de lexicalité, de position de lettre et d'hémisphère – pour un TP de 66 ms – sont présentés dans le tableau suivant :

N1	Latence	Amplitude moyenne
<i>effet de lexicalité</i>	$F[1,9] = 3.60; p = .09$	$F[1,9] = 10.55; p = .01$
<i>effet de position de lettre</i>	$F[2,18] = 2.57; p = .10$	$F[1.35,12.19] = 6.76; p = .02$
<i>effet d'hémisphère</i>	aucun résultat ⁴¹	$F[1,9] = .02; p = .89$
<i>Interaction lexicalité/position</i>	$F[2,18] = 3.52; p = .05$	$F[1.99,17.88] = 7.85; p = .004$

L'interaction lexicalité/position sur l'amplitude moyenne est étudiée grâce à une analyse post-hoc (*test de Scheffé*) : l'identification de lettre en contexte 'Mot' ou 'Non-mot' ne diverge pas significativement – en terme d'amplitude moyenne du pic N1 – si cette lettre est en position 1 ($p = .42$) ou 5 ($p = 1.0$) de la séquence. A l'inverse, si la lettre à identifier est en position 3 dans la séquence, la N1 est significativement plus ample si cette lettre est dans un mot plutôt que dans un non-mot ($p = .004$) (figure 8).

Pour compléter ce résultat, nous avons réalisé des tests *t* en séries appariées pour comparer les contextes 'Mot' et 'Non-mot' pour chacune des trois positions de lettres 1, 3 et 5. Des divergences significatives de tracés de PE ne sont obtenues entre les deux contextes lexicaux que pour la troisième position de lettre. Pour cette position, les tracés sont significativement différents entre 200 et 264 ms dans la région pariéto-occipitale gauche et entre 198 et 248 ms dans la région pariéto-occipitale droite (voir les barres jaunes sur la figure 4.9).

⁴¹ Aucun effet d'hémisphère ne peut être mesuré sur les latences des pics, ces latences étant identiques pour chacune des 64 électrodes.

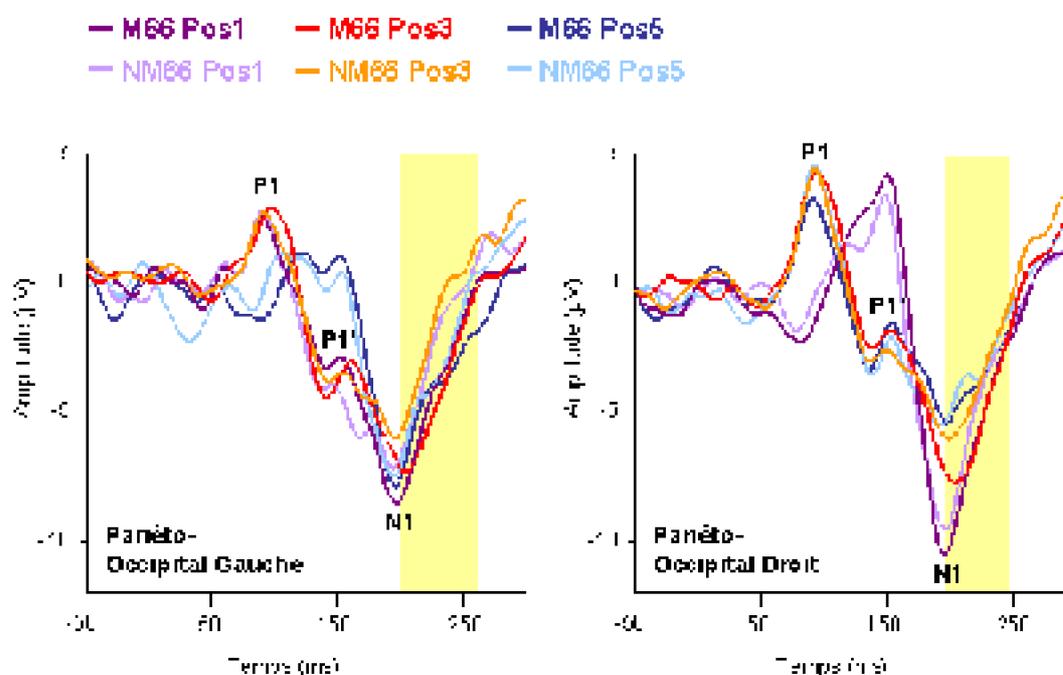


Figure 4.9 : PE mesurés dans les régions pariéto-occipitales gauche et droite (dérivations linéaires des électrodes O1, P5, PO3, PO7 et O2, P6, PO4, PO8), pour les deux contextes lexicaux Mot et Non-mot et les positions de lettres 1, 3 et 5. Les barres jaunes indiquent les intervalles de significativité du test t entre les contextes Mot et Non-mot pour la position 3, sur les dérivations linéaires droite et gauche (TP de 66 ms).

Nous observons par ailleurs, sur la figure 4.9, une décroissance de l'onde N1 dans l'hémisphère droit, quand on passe de la première à la cinquième position de regard. Ceci suggère l'existence d'un effet de position de regard (de type "Bottom-up") sur la phase d'identification de lettres, effet indépendant de la lexicalité de la séquence (observé en contexte 'Mot' et 'Non-mot').

Des analyses complémentaires, de localisation de source par exemple, permettraient d'expliquer ce phénomène énigmatique.

D.2. Discussion

Cette nouvelle analyse apporte un résultat important supplémentaire : l'efficacité d'identification d'une lettre varie en fonction de la position de cette lettre dans la séquence.

Dans un contexte de non-mots, les lettres externes sont significativement mieux identifiées que les lettres internes, la position centrale étant particulièrement défavorable. Cette observation est à mettre en relation directe avec l'effet de *masquage latéral* (Clark and O'Regan, 1999; Townsend et al., 1971) : une lettre est moins bien reconnue si elle est entourée d'autres lettres, qui "bruitent" l'information visuelle, par masquage latéral. Ainsi, une lettre au centre d'une séquence est difficilement identifiable de par le 'bruit visuel' environnant, et à l'inverse, une lettre à l'extrémité d'une séquence sera plus facilement identifiée car une quantité moindre d'information viendra masquer cette lettre cible. Cet effet typique de *masquage latéral* est mis en évidence dans notre expérience : en dehors de tout effet lexical (contexte 'Non-mot'), les taux d'erreurs en identification de lettre sont plus faibles pour les positions de lettres externes plutôt qu'internes (la position centrale étant particulièrement défavorable).

Dans la condition d'identification de lettre dans un mot, les performances maximales sont obtenues, à l'inverse, pour les positions de lettre centrales. Plus précisément, l'identification d'une lettre dans un mot de 5 caractères est optimale si cette lettre est en 2ème position, soit pour une position de regard juste à gauche du centre du mot⁴². Cette position optimale d'identification de lettre peut être mise en relation avec la position optimale de reconnaissance d'un mot, appelée "Optimal Viewing Position" ou OVP (voir chapitre 1 ; paragraphe D.3.b Psychophysique). O'Regan et al. ont découvert, dans les années 80, qu'il existe une position optimale de première fixation d'un mot pendant la lecture (O'Regan and Lévy-Schoen, 1987; O'Regan et al., 1984) : le temps de fixation total d'un mot durant la lecture est minimal quand la première fixation des yeux sur le mot est proche du centre du mot. De plus, la probabilité de reconnaître un mot présenté brièvement est plus grande si la fixation du regard est placée sur cette position particulière dans le mot.

D'après les résultats de psychophysique sur l'OVP, un mot de 5 lettres est mieux reconnu si le regard est fixé sur sa seconde lettre. D'après les résultats de notre étude, une lettre est mieux identifiée, au sein d'un mot de 5 lettres, si elle est en seconde position dans ce mot. Ainsi, la lettre la mieux identifiée d'un mot est celle située en *position optimale* de reconnaissance de ce mot.

A partir de ce constat, nous pouvons émettre deux hypothèses : (1) le phénomène d'OVP pourrait résulter du fait que la position quasi centrale du regard sur un mot favorise les effets "Top-down" lexicaux, et donc l'identification d'une lettre ou d'un mot entier. (2) A l'inverse, il est possible que du fait de l'existence de l'OVP (pour une autre raison), les mots sont stockés en mémoire en ayant été vus en position quasi centrale, et l'effet facilitateur de ces mémoires des mots est donc ensuite majeur pour cette position.

Si l'on compare maintenant les deux contextes lexicaux, on voit que l'effet d'incertitude de la reconnaissance des lettres internes à une séquence par rapport aux

⁴² Rappelons que dans ce paradigme expérimental, 'position de lettre dans la séquence' et 'position du regard' sont identiques.

lettres externes – dû au masquage latéral – peut être complètement renversé grâce aux effets "top-down" lexicaux intervenant lorsque l'identification se fait dans un contexte lexical. Les lettres centrales de la séquence sont alors mieux identifiées que les lettres externes, malgré le masquage latéral.

L'effet de lexicalité observé sur l'amplitude moyenne de la N1 dans l'analyse précédente est du à la position de lettre centrale et pas aux deux positions extrêmes : quel que soit le contexte lexical, la N1 ne varie pas en amplitude lorsque la lettre à identifier est la première ou la dernière d'une séquence de 5 lettres. Par contre, lorsque la lettre à identifier est en position centrale, la N1 est significativement plus ample si la lettre est contenue dans un mot par comparaison avec un non-mot.

Par ailleurs, les effets "Top-down" facilitateurs n'induisent pas une N1 plus ample pour la position 3 par rapport aux positions 1 et 5 (voir figure 4.9). C'est plutôt l'effet de masquage latéral – défavorisant la reconnaissance des lettres centrales – qui est 'amoindri' grâce aux effets "Top-down" lexicaux. La technique des Potentiels Evoqués ne nous permet pas de discerner quel serait le corrélat de cet 'amoindrissement' du masquage latéral.

D.3. Conclusion

Cette analyse des effets "Top-down" lexicaux en fonction de la position du regard dans les séquences nous permet d'affiner nos résultats : les effets "Top-down" lexicaux – qui facilitent l'identification d'une lettre en contexte lexical – sont majeurs pour les lettres situées au centre des mots. Ces effets induisent des variations significatives dans les tracés électrophysiologiques au stade de traitement des lettres.

La position du regard dans une séquence a donc une influence sur les effets "Top-down" lexicaux aidant à son identification. Mais ce facteur influence aussi directement les deux phases de traitement des traits visuels et des lettres d'une séquence (voir la figure 4.9).

Ces nouvelles observations nous permettent de compléter le schéma de synthèse présenté dans la figure 6 du paragraphe précédent (figure 4.10) :

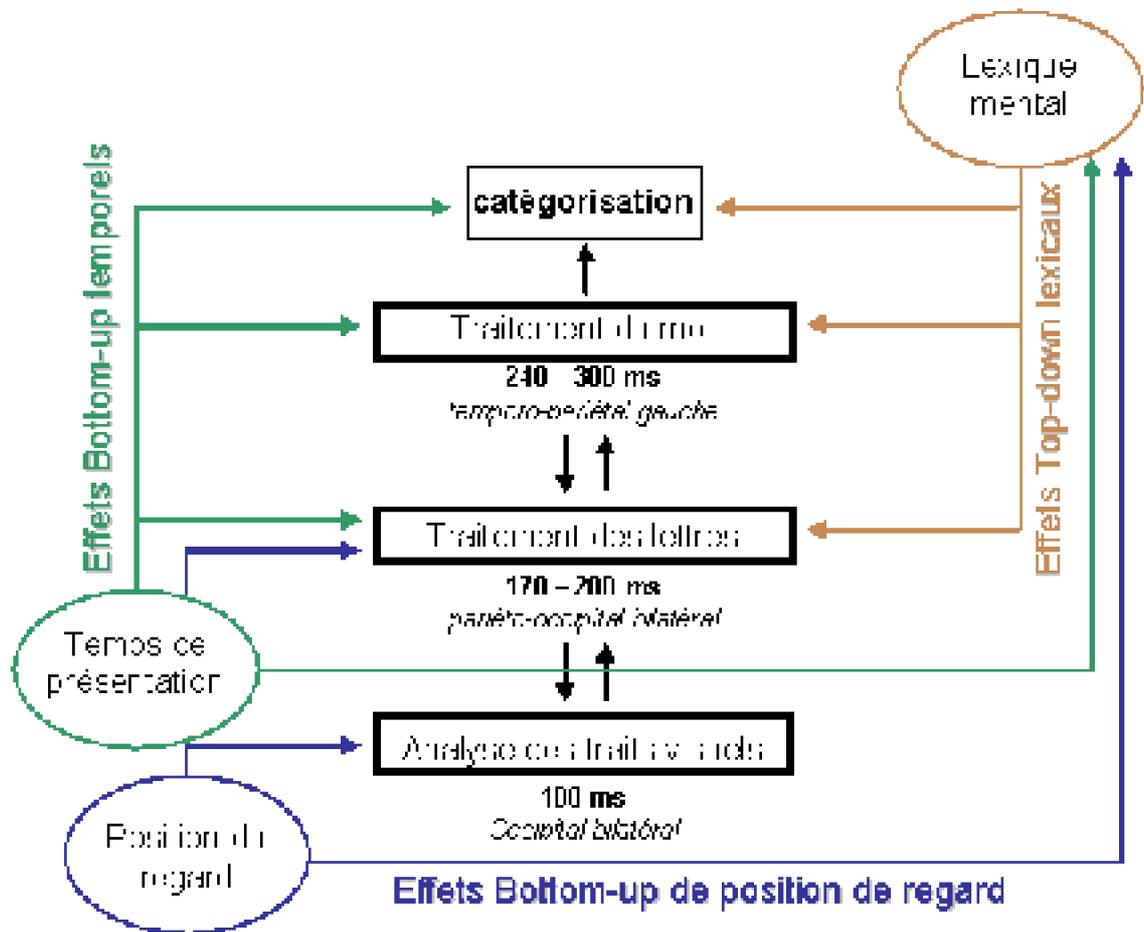


Figure 4.10 : Effets "top-down" et "Bottom-up" influençant l'identification d'une séquence de lettres.

E. Transfert interhémisphérique

E.1. Introduction

L'étude spécifique de la N1 en fonction des différentes positions de lettres nous a permis de remarquer un phénomène particulier sur l'onde P1 (voir la P1 dans les hémisphères droit et gauche en fonction de la position de lettre ; figure 4.9) : la P1 est retardée, dans l'hémisphère droit, pour l'identification de lettre en position 1 dans la séquence. Elle est retardée dans l'hémisphère gauche pour la position 5.

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

D'après le paradigme expérimental (figure 4.11), l'identification de lettre en position 1 implique que la quasi-totalité de l'information visuelle est projetée dans l'hémichamp visuel droit, et donc transférée à l'hémisphère gauche. Lorsque la lettre que le sujet doit reconnaître se trouve en dernière position de la séquence, la quasi-totalité de l'information est transmise à l'hémisphère droit. Les observations faites sur les PE (figure 4.9) suggèrent que l'information arrivant à l'hémisphère gauche (position 1) est transférée à l'hémisphère droit avec un certain délai (retard de la P1 dans l'hémisphère droit pour la position 1). Le phénomène inverse est observé lorsque l'information visuelle arrive en quasi-totalité à l'hémisphère droit. Cette observation est schématisée sur la figure 4.12, sur laquelle sont représentés les tracés de Potentiels Evoqués de la figure 4.9, uniquement pour les positions de regard 1 et 5, ainsi que les conditions expérimentales correspondant à ces deux positions de regard.

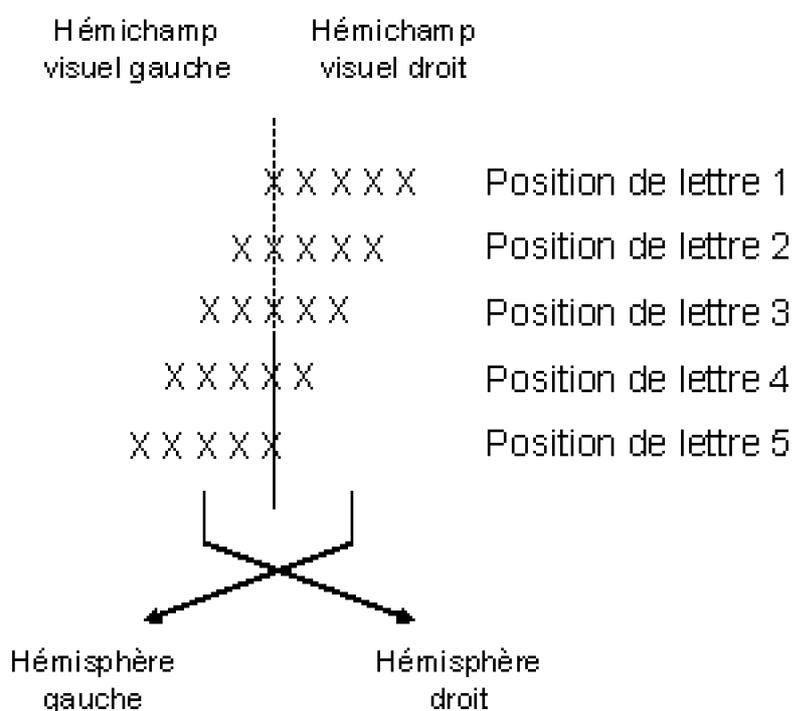


Figure 4.11 : Schématisation du paradigme expérimental : la répartition de la quantité d'information visuelle (pour chaque position de lettre testée) varie dans chaque hémichamp visuel et donc dans chaque hémisphère cérébral.

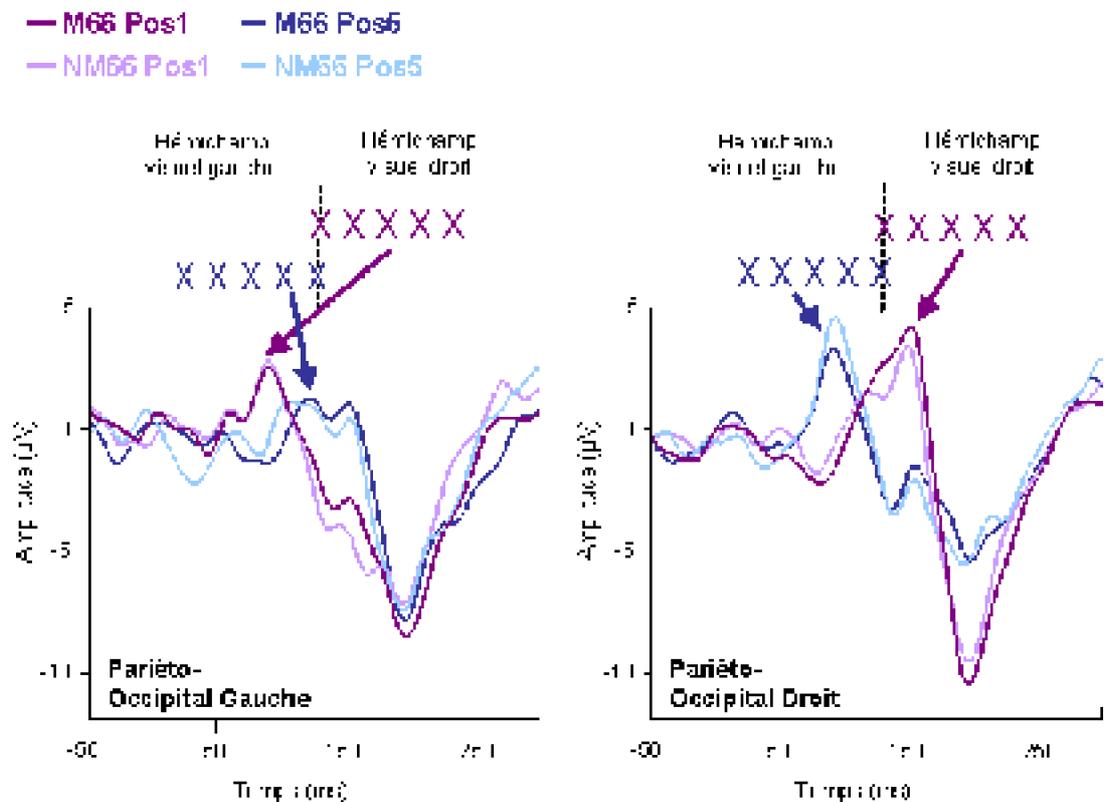


Figure 4.12 : PE mesurés dans les régions pariéto-occipitales gauche et droite, pour les deux contextes lexicaux Mot et Non-mot et les positions de lettres 1 et 5 (TP de 66 ms).

Les conditions expérimentales correspondant aux deux positions de regard sont schématisées en haut de la figure, afin de mettre en évidence le délai de l'onde P1 dans l'hémisphère gauche pour la position 5 de regard, et le délai dans l'hémisphère droit pour la première position de regard.

Puisque l'information visuelle est transmise d'un hémisphère à l'autre pour les positions de lettres extrêmes, nous pouvons en déduire un temps de transfert interhémisphérique.

E.2. Temps de transfert interhémisphérique

La P1 est un évènement électrophysiologique majeur qui a été exploré entre autres pour estimer le temps de transmission inter-hémisphérique (ou IHTT pour "InterHemispheric Transmission Time") : l'onde P1 est légèrement retardée et réduite en amplitude au

niveau de l'hémisphère indirectement stimulé, soit l'hémisphère ipsilatéral à une stimulation visuelle unilatérale (Bayard et al., 2004). La différence de latence du complexe P1/N1 ipsilatéral *versus* contralatéral chez des sujets contrôles a été interprétée comme reflétant le temps de transfert par le corps calleux (voir (Saron and Davidson, 1989)).

Nous allons donc, grâce aux valeurs de latences de P1, définir l'IHTT spécifique à notre paradigme expérimental.

E.3. Résultats

Nous avons recensé les valeurs individuelles de latences de P1, pour les positions de lettres 1 et 5, dans les deux hémisphères. La composante P1 ayant une distribution maximale dans les régions occipitales (Arroyo et al., 1997; Bonmassar et al., 2001), et les sites occipitaux latéraux produisant une meilleure estimation de l'IHTT que les sites médians (Saron and Davidson, 1989), nous avons estimé l'IHTT de cette expérience grâce aux valeurs de latence de la P1 sur les électrodes PO7 et PO8. De plus, la P1 étant indépendante du contexte lexical et du temps de présentation (voir résultats du paragraphe C.1.b), l'IHTT a été estimé à partir des données individuelles de latences de P1, tous contextes lexicaux et temps de présentation confondus.

Nous avons testé les variables position (1 et 5) et hémisphère (gauche et droit) par analyse de variance à mesures répétées.

L'analyse des latences de la P1 révèle un effet significatif de la position de lettre ($F[1, 9] = 9.96$; $p = .01$), aucun effet d'hémisphère ($F[1, 9] = 2.89$; $p = .12$), et une forte interaction position/hémisphère ($F[1, 9] = 75.29$; $p = .000 01$). L'interaction entre les deux facteurs est mise en évidence sur la figure 4.13.

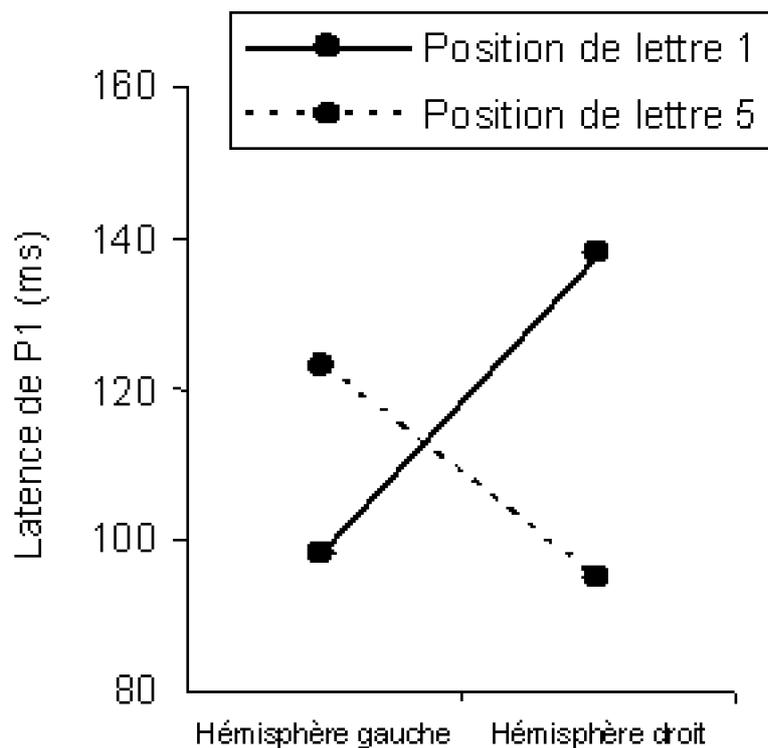


Figure 4.13 : Latences moyennes de P1 dans les deux hémisphères cérébraux, pour les positions de lettres 1 et 5. Le graphique illustre la forte interaction existant entre les deux facteurs de position et d'hémisphère.

Les temps de transfert interhémisphérique individuels ont été calculés grâce aux formules suivantes :

$$\text{Transfert}_{\text{HG} \square \text{HD}} = \text{Latence}_{\text{P1-D}} - \text{Latence}_{\text{P1-G}}$$

$$\text{Transfert}_{\text{HD} \square \text{HG}} = \text{Latence}_{\text{P5-G}} - \text{Latence}_{\text{P5-D}}$$

HG = Hémisphère gauche

HD = Hémisphère droit

P1-D = première position de lettre, hémisphère droit

P1-G = première position de lettre, hémisphère gauche

P5-D = cinquième position de lettre, hémisphère droit

P5-G = cinquième position de lettre, hémisphère gauche

Les deux temps moyens de transfert ont été calculés grâce à la moyenne des temps individuels. La similitude des deux valeurs d'IHTT a été testée statistiquement par test t .

$$\text{Transfert}_{\text{HG} \square \text{HD}} = \mathbf{40 \text{ ms}}$$

$$\text{Transfert}_{\text{HD} \square \text{HG}} = \mathbf{28 \text{ ms}}$$

La différence entre les deux valeurs de temps de transfert n'est pas significative (valeur de p du test $t = .12$).

E.4. Discussion

L'identification de lettres en positions 1 ou 5 d'une séquence induit une P1 dans l'hémisphère controlatéral à l'hémichamp visuel stimulé, environ 100 ms après stimulation. Par contre, nous n'observons pas de P1 au niveau de l'hémisphère ipsilatéral, pour la même fenêtre temporelle. Ainsi, la première conclusion que l'on peut tirer de cette dernière analyse est que l'information visuelle provenant d'items présentés en vision fovéale n'est pas envoyée simultanément aux deux hémisphères cérébraux, quand ces items sont fixés à leurs extrémités. Cette hypothèse a déjà été émise par Brysbaert (Brysbaert, 1994; Brysbaert, 2004), bien que l'idée que les mots présentés en vision fovéale soient transmis (en deux copies complètes) en parallèle aux deux hémisphères soit fréquemment défendue (Leventhal et al., 1988; Stone et al., 1973; Trauzettel-Klosinski and Reinhard, 1998).

Ces résultats suggèrent aussi qu'une quantité minimale d'information visuelle est nécessaire pour induire un événement P1 dans le cortex visuel controlatéral. En deçà du seuil de 1,5 lettres présentes dans un hémichamp, aucune P1 n'est enregistrée dans l'hémisphère controlatéral. Au-delà de ce seuil, tout stimulus visuel produira une P1 avec la même amplitude et la même latence quelle que soit la quantité d'information graphique.

La forte interaction entre positions et hémisphères observée dans l'analyse des latences de P1 illustre le fait que ces latences sont très différentes dans les deux hémisphères selon la position de la lettre dans la séquence.

Par ailleurs, la latence moyenne de P1 est significativement plus grande pour la position 1 que pour la position 5 : ceci suggère une différence de temps de transfert interhémisphérique de l'hémisphère droit au gauche et inversement. Cette suggestion est confirmée par les calculs de temps de transfert : dans le cas particulier de notre étude, le transfert hémisphérique se fait en 30-40 ms environ. Il a tendance à être plus rapide de l'hémisphère droit à l'hémisphère gauche (28 ms) que dans le sens inverse (40 ms), même si ce résultat n'est pas statistiquement significatif. Ce temps de transfert plus rapide de droite à gauche que de gauche à droite a déjà été mis en évidence par différents auteurs (Ipata et al., 1997; Saron and Davidson, 1989).

Dans les précédentes études sur l'IHTT que nous avons recensées, ce temps de transfert est estimé à environ 10-15ms (Brown et al., 1998; Saron and Davidson, 1989). Les valeurs d'IHTT que nous obtenons, plus élevées que celles précédemment publiées dans la littérature, peuvent s'expliquer par le fait que les stimuli de cette expérience sont complexes, de type lexical, alors que des damiers ou des flashes lumineux étaient utilisés dans les précédentes expériences. Par ailleurs, nos résultats sont en accord avec l'hypothèse émise par Ono et al. selon laquelle les délais interhémisphériques mesurés grâce aux Potentiels Evoqués devraient être supérieurs au temps de conduction axonale interhémisphérique estimé à environ 20 ms (Ono et al., 2002).

Chap 5. Reconnaissance de mots : "Effets Top-down" attentionnels

A. Introduction

La technique des Potentiels Evoqués est utilisée pour étudier les effets attentionnels depuis la fin des années 60 (Eason, 1969), ce qui a permis de produire de nombreuses connaissances sur ce sujet.

Aujourd'hui encore, la question fondamentale quant aux effets attentionnels est de savoir s'ils influencent le traitement de l'information à des stades précoces ou tardifs. Leur influence sur les phases tardives de traitement est évidente, puisque nous sommes capables, par exemple, d'ignorer volontairement un stimulus préalablement identifié. Mais pour ce qui est de l'influence précoce des effets attentionnels, la réponse est moins évidente (Eason, 1969; Hillyard et al., 1973).

Il existe deux effets attentionnels principaux : le soutien de l'attention et l'attention sélective :

(1) Le soutien de l'attention permet de distinguer le traitement d'un objet, d'un mot etc... selon que le stimulus doit être traité activement pour répondre aux besoins de la tâche, ou qu'il doit au contraire être observé passivement.

(2) L'attention sélective du sujet lui permet d'être 'focalisé' sur une certaine catégorie de stimuli, lors de la présentation aléatoire et successive de plusieurs types de stimuli.

A.1. Le soutien d'attention

Un sujet traite différemment un stimulus lorsqu'il réalise une tâche active (test de dénomination, de génération...) plutôt que lorsqu'il le voit passivement (Shulman et al., 1997a). Ce type de tâche met en évidence les effets de soutien d'attention : par exemple, les traitements visuels de mots lus peuvent augmenter lorsque les sujets doivent lire les mots à haute voix plutôt que silencieusement, même si les "inputs" visuels sont les mêmes (Price et al., 1997a; Shulman et al., 1997b). L'influence des effets "Top-down" attentionnels serait significative dès les traitements visuels primaires, dans le cortex occipital (Shulman et al., 1997a).

A cette augmentation d'activité dans les régions spécifiques du traitement du stimulus présenté s'ajoutent diverses activations significativement plus importantes en condition de soutien plutôt que de relâchement d'attention : différentes aires du cortex pré-frontal, du cortex pré-moteur et du cortex cingulaire antérieur sont activées dans des tâches qui requièrent l'attention soutenue du sujet (Frith and Dolan, 1997; Mesulam, 1990).

A.2. L'attention sélective

Trois types d'études testant l'attention sélective ont été publiés dans la littérature :

(1) Lorsque l'attention du sujet est focalisée dans une région de l'espace versus une autre, il sera plus rapide et efficace pour traiter un stimulus apparaissant en localisation 'cible' plutôt qu'ailleurs sur l'écran (Posner, 1980; Posner et al., 1980).

Les études réalisées en PE révèlent qu'un stimulus de localisation 'attendue' est traité différemment qu'un stimulus de localisation inattendue, dès 60 ms après sa présentation visuelle (stades de traitement 'bas niveau') (Hillyard and Munte, 1984; Neville and Lawson, 1987; Rugg et al., 1987) : les ondes P1 et N1 sont plus amples lors du traitement de stimuli projetés en localisation 'cible' (Luck, 1994; Mangun and Hillyard, 1991; Posner and Gilbert, 1999).

(2) Lorsque deux types de stimuli sont présentés simultanément à un sujet, les traitements seront influencés selon que le sujet porte son attention sur une catégorie de stimuli, l'autre ou les deux en même temps. On parle alors d'effet "cocktail party". Ce test d'attention sélective révèle par exemple que la focalisation de l'attention d'un sujet sur deux tâches simultanément entraîne une diminution des performances comportementales pour une tâche ou pour les deux (Meyer and Kieras, 1997; Navon and Miller, 2002). Lorsque des stimuli sont envoyés simultanément à un sujet, dans différentes modalités (vision, audition oreille gauche et audition oreille droite par exemple), les aires spécifiques au traitement des stimuli attendus sont plus activées que lorsque les mêmes stimuli ne sont pas les cibles de la tâche (Vorobyev et al., 2004).

(3) D'autres études ont montré que la discrimination d'un attribut particulier d'un stimulus (forme, couleur...) est plus efficace quand l'attention du sujet est focalisée sur cet

attribut (attention sélective) plutôt que sur plusieurs (attention divisée) ou aucun (Corbetta et al., 1990; Corbetta et al., 1991; Posner and Gilbert, 1999).

Il faut noter tout de même que l'attention sélective influence ou non les différents stades de traitement d'un stimulus, en fonction de la tâche (Luck et al., 2000; Posner and Gilbert, 1999). Luck & Hillyard proposent que l'attention sélective influe sur le traitement d'un stimulus uniquement si les interférences avec ce traitement précis sont trop importantes (Luck and Hillyard, 1999). Ainsi, si les distracteurs ne 'gênent' pas la réalisation du traitement, l'attention sélective portée sur le type de stimuli à traiter n'aura aucune incidence. A l'inverse, si la tâche est plus difficile à réaliser lorsque les distracteurs sont traités, l'attention sélective permettra de 'focaliser' le sujet uniquement sur les stimuli 'cibles'.

A.3. Problématique

Lors du traitement d'objets, de formes géométriques etc... l'attention sélective portée sur la localisation dans l'espace, la forme ou la couleur de ces objets influence leur traitement dès les stades les plus précoces. Il reste à définir si un traitement de plus haut niveau (décision lexicale par exemple) peut aussi être influencé par l'attention sélective portée sur une certaine catégorie linguistique (mots ou pseudo-mots par exemple), et si cette influence se répercute aussi dès les niveaux de traitement précoces.

De plus, notre paradigme expérimental nous permettra de tester les effets de soutien d'attention dans l'attente d'une prise de décision : (a) nous définirons à quel point les différentes phases de traitement d'une séquence linguistique sont influencées selon que cette séquence est nécessairement traitée au niveau cognitif, avec prise de décision, ou qu'elle est traitée de manière automatique et ne fait pas l'objet d'une prise de décision. (b) Par ailleurs, un soutien d'attention dans l'attente d'une prise de décision implique le stockage de l'information pertinente en mémoire de travail. La composante du stockage d'information en mémoire de travail pourra donc aussi être analysée.

Si le soutien de l'attention influence le traitement d'un stimulus – de type linguistique par exemple –, avec une activation plus soutenue des différentes aires cérébrales impliquées dans le traitement lorsque le stimulus est traité activement plutôt que vu passivement, il sera intéressant d'étudier à quel point ce soutien d'attention peut interagir avec l'attention sélective, et ce dans notre cas aux différents stades de traitement de séquences de lettres.

Pour répondre à ces principales questions, nous avons réalisé une étude en Potentiels Evoqués testant les effets de l'attention sélective et du soutien de l'attention (comprenant la composante du stockage en mémoire de travail), ainsi que leurs interactions, au cours d'une tâche particulière de décision lexicale.

B. Paradigme expérimental et hypothèses

Dans cette expérience, nous avons utilisé un paradigme particulier testé en Potentiels Evoqués (Thierry et al., 1998; Thierry et al., 2003b) permettant d'étudier la course temporelle de la discrimination entre mots et pseudo-mots, en faisant varier le contexte attentionnel.

Dans ce paradigme – appelé paradigme du "Hold/Release" – les participants doivent décider si deux stimuli présentés de manière séquentielle (paire d'items présentés successivement) appartiennent à une même catégorie – précédemment spécifiée – ou non (e.g., 'identifier les paires de stimuli constituées de deux mots'). Lorsque le premier item est incongruent avec la catégorie cible (e.g., l'item est un pseudo-mot), les sujets peuvent immédiatement prendre une décision puisque la paire de stimuli ne peut pas être une paire cible (condition 'Release'). Lorsque le premier stimulus d'une paire est congruent avec la catégorie cible (e.g., l'item est un mot), les sujets doivent maintenir leur attention jusqu'à ce qu'ils aient traité le second item pour pouvoir prendre une décision (condition 'Hold').

Ce paradigme permet de tester trois facteurs principaux :

(1) le soutien de l'attention :

Lorsque le second item d'une paire est affiché, le sujet peut se trouver dans deux conditions différentes : (a) ou bien le premier item était incongruent avec la cible (condition 'Release'), le sujet n'a donc pas à traiter le second item pour réaliser la tâche (la prise de décision a déjà eu lieu ou est en train d'avoir lieu). (b) Si le premier item de la paire était congruent avec la cible, le sujet devra attendre de traiter le second item (condition 'Hold') afin de prendre sa décision.

Ainsi, en comparant les PE induits après présentation du second item d'une paire, entre les conditions 'Hold' et 'Release', nous pourrions définir les variations de traitement qu'il y ait soutien ou non de l'attention (et donc charge, ou non, d'information lexicale en mémoire de travail).

De nombreux auteurs ont montré que le complexe P1/N1 est sensible aux effets attentionnels : les stimuli 'cible' induisent un complexe P1/N1 plus ample que les stimuli inattendus (Hopfinger and Maxwell, 2005; Kutas and Dale, 1997; McCarthy and Nobre, 1993; Van der Lubbe and Woestenburg, 2000; Wijers et al., 1997). Ainsi, nous faisons l'hypothèse que le soutien d'attention manipulé dans notre expérience induira de la même manière des variations d'amplitude du complexe P1/N1 : les ondes P1 et N1 devraient être plus ample pour des stimuli traités volontairement que pour des stimuli vus passivement, sans 'aide' attentionnelle.

De plus, nous analyserons l'onde P300, connue pour refléter les phénomènes attentionnels (pour une revue voir (Donchin et al., 1986)) : cet événement devrait être fortement dépendant de l'état attentionnel du sujet, voire être inexistant si le sujet ne traite pas volontairement l'item (prise de décision après le premier item ; condition 'Release').

(2) l'attention sélective :

La consigne de la tâche peut être de détecter parmi l'ensemble des quatre combinaisons possibles, par exemple les paires de mots ou bien les paires de pseudo-mots : le sujet se verra présenter un mot, ou un pseudo-mot (en tant que premier

ou deuxième item d'une paire) en ayant focalisé son attention sur l'une ou l'autre des catégories.

Ainsi, en comparant les conditions 'cible Mot' et 'cible Pseudo-mot' après présentation du premier ou du deuxième item d'une paire, nous pourrions comparer les traitements des mots et des pseudo-mots, selon que l'attention du sujet était dirigée sur une catégorie ou l'autre.

De même que pour les effets de soutien d'attention, nous supposons que le complexe P1/N1 est dépendant de l'attention sélective (Kutas and Dale, 1997; McCarthy and Nobre, 1993).

Par ailleurs, il est probable que l'attention sélective portée sur la catégorie des mots induise une 'pré-activation' du lexique mental. Or, les stades de traitement des lettres (N1) et de catégorisation des items (P300) devraient être influencés par le fait que cette pré-activation du lexique soit engagée ou non. Ainsi, nous devrions observer une modulation des événements N1 et P300 sous l'influence de l'attention sélective et de sa cible, lexicale ou non.

(3) la congruence de l'item avec la catégorie cible :

Lorsque les sujets ont reçu la consigne de focaliser leur attention sur une catégorie (e.g. 'identifier les paires de mots'), ils peuvent être confrontés à deux situations différentes, après la présentation du premier comme du deuxième item : l'item affiché à l'écran peut être congruent avec la catégorie cible (e.g. l'item est un 'mot') ou bien être incongruent (e.g. l'item est un 'pseudo-mot').

Ainsi, en comparant les conditions de 'congruence' et 'incongruence', après le premier ou le second item, nous pourrions définir l'incidence de l'incongruence d'un stimulus avec le type d'items attendu, et ce indépendamment de la nature de la cible (mots ou pseudo-mots).

Le stade de traitement des lettres, reflété par la N1, permet de différencier des lettres par rapport à tout autre symbole (Salmelin et al., 2000). Par contre, nous supposons qu'aucun traitement lexical n'a lieu à ce stade, ne permettant pas de différencier les mots des pseudo-mots (Fiebach et al., 2002). Si tel est le cas, la N1 ne devrait pas être sensible à la congruence de l'item avec la cible, cet item n'ayant pas encore été catégorisé à ce stade comme appartenant à une catégorie ou l'autre. Il en est de même pour l'onde P1 – qui reflète le traitement des traits visuels – qui ne devrait pas être sensible à la congruence d'un item avec une catégorie cible.

En revanche, les items incongruents avec la cible devraient entraîner des temps de catégorisation plus longs et une charge attentionnelle plus importante que les items 'attendus'. La P300 devrait donc être plus ample et retardée pour les items incongruents (Kramer and Strayer, 1988; Kutas et al., 1977; McCarthy and Donchin, 1981; Polich, 1986; Wickens et al., 1983).

Nous allons donc tester un paradigme expérimental particulier nous permettant d'analyser ensemble les différents effets attentionnels (1) du soutien de l'attention, (2) de l'attention sélective et (3) de la congruence d'un item avec une cible 'attendue'.

C. Matériel et méthodes

C.1. Participants

Seize sujets de langue maternelle française ont passé cette expérience (8 hommes et 8 femmes, d'un âge moyen de 21.7 ans \pm 2.1, tous droitiers). Chaque sujet a donné préalablement son consentement éclairé pour participer à un protocole de recherche sans bénéfice individuel direct. Ce protocole avait été validé par un comité d'éthique local et assuré par l'INSERM. Tous les sujets avaient par ailleurs une vue normale ou corrigée à la normale.

C.2. Stimuli

Les stimuli utilisés sont 80 noms communs français (e.g., ACTEUR) sélectionnés dans la base de données Brulex (Content, 1990) et 80 pseudo-mots (e.g., AETEUR) (liste complète en annexe 5.1). Les pseudo-mots sont des séquences de lettres prononçables construites en intervertissant ou en remplaçant 1 ou 2 lettres de la première syllabe de chaque nom, afin d'obtenir un digraphe aberrant au niveau de la position optimale du regard dans le mot (OVP) (voir (O'Regan et al., 1984), ainsi que le chapitre 1 ; paragraphe D.3.b). Les stimuli ont une longueur moyenne de 5,65 \pm 0,48 lettres (de 5 à 6 lettres) et la valeur logarithmique de la fréquence lexicale moyenne des noms est de 3,41 (de 3,11 à 3,70).

Quatre groupes de paires d'items ont été générés ('mots – mots', 'mots – pseudo-mots', 'pseudo-mots – mots' et 'pseudo-mots – pseudo-mots') de manière pseudo aléatoire afin d'éviter tout lien sémantique ou phonologique entre deux items d'une même paire.

C.3. Tâche et procédure

La tâche comprend deux consignes ; les participants ont pour consigne de presser un bouton préalablement défini :

- *pour la consigne 'cibles Mots'* : lorsqu'ils voient des paires de mots (e.g., ACTEUR – LIONNE) et un autre bouton pour toutes les autres combinaisons (e.g., LISTE – DAEOUR ; NEAINE – REVEIL et IUSTE – TIATUE)

- *pour la consigne 'cibles Pseudo-mots'* : lorsqu'ils voient des paires de pseudo-mots, et un autre bouton pour les trois autres combinaisons.

Chaque sujet reçoit les deux types de consignes (deux conditions de cibles) avec les mains de réponse contre-balancées entre les blocs. L'ordre de passation des conditions cibles est par ailleurs contre-balancé entre les sujets.

Si le premier item de la paire est congruent avec la catégorie cible, le sujet doit maintenir son attention (condition 'Hold'), et traiter le second item de la paire pour prendre sa décision et répondre. Si le premier item de la paire est incongruent avec la catégorie cible, le sujet peut relâcher son attention (condition 'Release') et répondre avant, pendant ou après l'apparition du second item de la paire (qu'il n'a pas à traiter nécessairement pour prendre sa décision et répondre). Les différentes conditions expérimentales sont résumées dans le tableau 5.1.

Huit séries de 40 paires sont présentées aux sujets. Chaque essai débute par l'affichage, sur un écran d'ordinateur, d'une croix de fixation centrée. Chaque stimulus de chaque paire est affiché successivement au niveau de la fixation du regard durant 100 ms, avec un écran blanc de 620 ms entre les deux items d'une paire. L'intervalle entre les paires varie de 2000 à 3000 ms (voir la figure 5.1). Chaque stimulus est utilisé une fois en première et une fois en seconde position de paire, ceci pour chacune des deux consignes.

Tableau 5.1 : Descriptif des différentes conditions expérimentales de la tâche. Les mains de réponse et l'ordre des consignes sont contre-balancés pour chaque sujet, et entre tous les sujets de l'expérience (m = mot et p = pseudo-mot).

Consigne	Item 1	Item 2	Condition	Bouton de réponse	Condition attentionnelle	Exemple
"presser le bouton A pour les paires de Mots, B dans tous les autres cas"	m m p	m p m p	Mmm Mmp	M B B B	Hold Hold Release	ASTUR LIONNE LISTE – DAEOUR NEAINE – REVEIL IUSTE – TIATUE
"presser le bouton A pour les paires de Pseudo-mots, B dans tous les autres cas"	m m p	m p m p	Pmm Pmp	P B B B	Release Release Hold	ASTUR LIONNE LISTE – DAEOUR NEAINE – REVEIL IUSTE – TIATUE

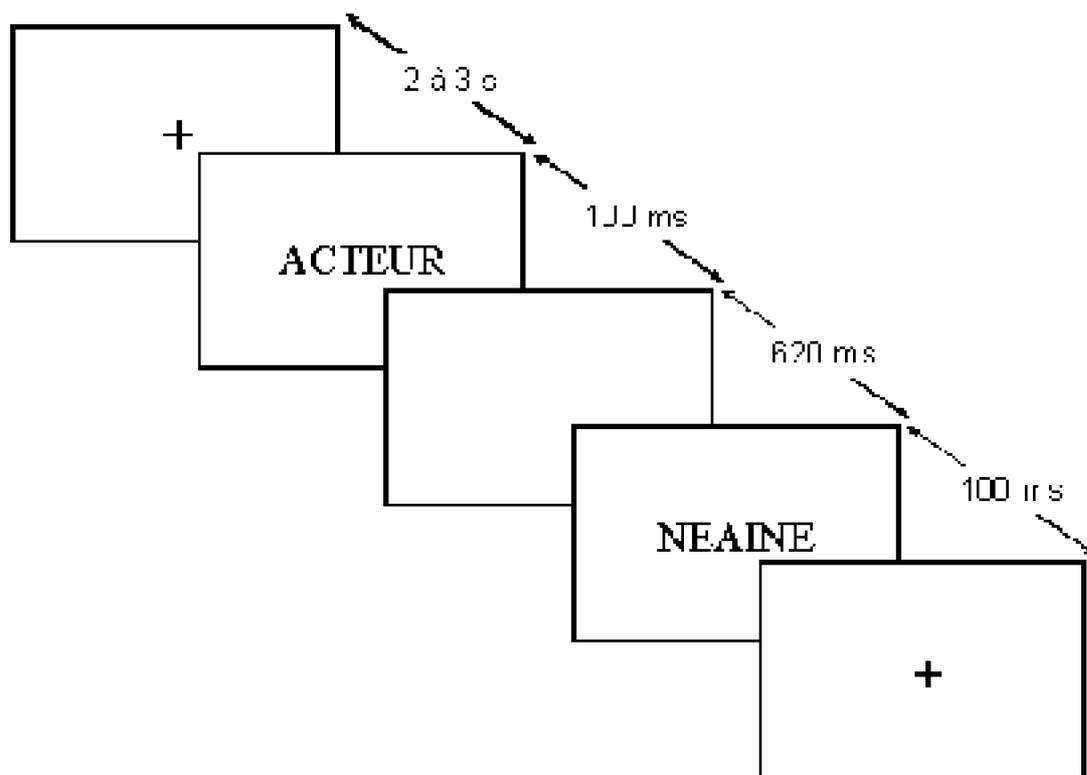


Figure 5.1 : Design expérimental du paradigme 'Hold/Release' : déroulement temporel de la tâche (exemple d'un essai).

C.4. Acquisition et traitement des Potentiels Evoqués

Les sujets sont confortablement assis dans une pièce insonorisée, et reçoivent la consigne de bouger et cligner des yeux le moins possible. Les données électrophysiologiques sont enregistrées grâce à 64 électrodes Ag/AgCl reliées à des amplificateurs SynAmpsTM (NeuroscanTM, El Paso, TX, USA), à une fréquence d'échantillonnage de 500 Hz. L'électro-oculogramme est enregistré simultanément, à l'aide de deux électrodes supra- et infra-orbitales. Le signal est filtré 'on-line' entre 0.1 et 100 Hz. Les impédances sont maintenues tout au long de l'enregistrement à des valeurs inférieures à 20 kOhms. Les enregistrements continus sont ensuite filtrés 'off-line' avec un filtre passe-bande de [1 – 40] Hz. Les artefacts oculaires sont retirés du signal à l'aide d'un algorithme de correction, et les autres portions bruitées observées sur les tracés sont retirées manuellement de l'enregistrement. Un découpage du signal continu est ensuite réalisé dans la fenêtre temporelle [-300 – 1700] ms autour de chaque trigger de stimulation (correspondant au premier item d'une paire). Une correction de la ligne de base relative à l'activité pré-stimulation est appliquée à chaque segment. Sur les 40 segments par condition existant pour chaque sujet, ceux correspondant à des réponses fausses sont rejetés. Les segments restant sont moyennés afin d'obtenir les moyennes individuelles par condition. Les différences individuelles entre conditions et les "grandes

moyennes" sont alors calculées à partir des tracés de PE individuels (pour plus de détail sur chaque étape de traitement, voir chapitre 3 ; paragraphes C.2 et C.3).

C.5. Analyses statistiques

Les résultats comportementaux (taux d'erreurs et temps de réaction) sont comparés entre conditions à l'aide d'une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA), afin d'estimer les effets principaux (Hold/Release et cible Mots/cible Pseudo-mots) et les possibles interactions entre ces facteurs. Afin de corriger les éventuelles violations de sphéricité, une *correction de Greenhouse-Geisser* a été appliquée aux statistiques (Greenhouse and Geisser, 1959).

Une recherche automatique des principaux pics de potentiels a été réalisée dans les intervalles de temps définis sur la "Mean Global Field Power" des 64 électrodes (Picton et al., 2000).

Pour la détection de pics après présentation du premier item, les intervalles de recherche sont [60 – 114] ms pour la P1, [114 – 170] ms pour la N1 et [370 – 590] ms pour la P300. Pour la détection de pics après présentation du second item, les intervalles sont [780 – 830] ms pour la P1, [830 – 876] ms pour la N1 et [1030 – 1280] ms pour la P300 (la latence séparant la présentation du premier et du second item d'une paire est de 720 ms).

Les amplitudes moyennes et les latences des pics sont analysées, par ANOVA à mesures répétées, au niveau des électrodes de sensibilité maximale. L'analyse est faite sur les électrodes P3, P5, PO3, PO7, P4, P6, PO4, PO8 pour la P1 et la N1 ; C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2 pour la P300. Les facteurs de l'ANOVA sont, selon les analyses, le soutien d'attention (Hold ou Release), la catégorie cible (Mots ou Pseudo-mots), la congruence de l'item avec la cible (Congruence ou Non-congruence) et l'hémisphère⁴³ (Gauche ou Droit).

Afin de comparer les temps de réaction et les latences de pics après présentation du premier ou du second item d'une paire, nous avons ramené toutes les valeurs temporelles à un temps zéro de référence correspondant au temps de présentation de l'item ayant induit l'évènement. Ainsi, les TR et latences de pics après présentation du premier item sont maintenues telles quelles. Par contre, toute réponse et tout pic intervenant après présentation du second item a sa latence ramenée à un temps zéro correspondant au temps 720 ms sur l'enregistrement (720 ms est la latence d'apparition du second item d'une paire, si 0 ms est le temps d'apparition du premier item de la même paire).

Par ailleurs, la correction de la ligne de base du signal électrophysiologique a été faite sur l'intervalle [-50 ; 0] ms, le temps zéro étant toujours le temps de présentation du premier item. Pour l'étude des PE après présentation du second item (analyses 2 et 3), la correction de la ligne de base est faite sur le même intervalle, cette fois dans la période

⁴³ Le facteur hémisphérique correspond à l'hémisphère d'enregistrement, afin de définir si les pics observés sont bilatéraux ou latéralisés. Il ne s'agit pas d'hémisphère de stimulation (information visuelle envoyée à l'hémisphère gauche ou droit), puisque tous les stimuli de l'expérience sont présentés en vision fovéale.

précédant l'apparition du second stimulus. Cette correction est donc faite, sur l'enregistrement EEG, dans l'intervalle [670 ; 720] ms.

Nous allons à présent décrire les résultats obtenus grâce à trois analyses différentes des données :

(1) Dans la première analyse, nous allons étudier les PE après présentation du premier item d'une paire. Nous allons pouvoir tester les effets d'**attention sélective** et de **congruence** : quelles sont les variations de potentiels selon la catégorie cible, et selon que le premier item de la paire est congruent ou non avec cette catégorie cible ?

(2) Dans la seconde analyse, nous étudierons les PE après présentation du second item d'une paire, en condition de maintien d'attention (i.e. en condition 'Hold', lorsque le premier item de la paire était congruent avec la cible et que le sujet maintient son attention pour traiter le second item et prendre sa décision). Nous testerons à nouveau les effets d'**attention sélective** et de **congruence** : quelles sont les variations de potentiels selon la catégorie cible et selon que le second item de la paire est congruent ou non avec cette catégorie cible, alors que le premier item de cette paire était lui-même congruent ?

(3) Enfin, nous étudierons dans une troisième analyse les PE obtenus après présentation du second item d'une paire, en fonction du maintien ou du relâchement de l'attention. Nous testerons alors les effets de **soutien d'attention** et d'**attention sélective** : quelles sont les variations de potentiels selon la catégorie cible et selon que l'item est nécessairement traité (le premier item était congruent avec la cible ; condition 'Hold') ou non (le premier item était incongruent avec la cible et la décision est donc déjà prise ; condition 'Release') ?

D. Résultats

Dans la présentation des résultats, nous symboliserons les différentes conditions de la manière suivante :

<i>Condition</i>	<i>Cible</i>	<i>Paires d'items</i>	<i>Condition</i>	<i>Cible</i>	<i>Paires d'items</i>
Mmm	Mot	mot / mot	Pmm	Pseudo-mot	mot / mot
Mmp	Mot	mot / pseudo-mot	Pmp	Pseudo-mot	mot / pseudo-mot
Mpm	Mot	pseudo-mot / mot	Ppm	Pseudo-mot	pseudo-mot / mot
Mpp	Mot	pseudo-mot / pseudo-mot	Ppp	Pseudo-mot	pseudo-mot / pseudo-mot

D.1. Résultats comportementaux

Les résultats comportementaux sont représentés sur la figure 5.2, les résultats statistiques étant reportés dans le tableau ci-dessous. Les facteurs analysés sont la catégorie cible ('Mot' *versus* 'Pseudo-mot') et la condition d'attention ('Hold' ; réponse

après présentation du second item *versus* 'Release' ; prise de décision et réponse du sujet après présentation du premier item).

	% d'erreurs	Temps de réaction
<i>effet de catégorie cible</i>	F[1,15] = 5.35; p = .035	F[1,15] = 12.53; p = .003
<i>effet de condition d'attention</i>	F[1,15] = 11.77; p = .004	F[1,15] = 64.76; p < 10 ⁻⁵
<i>interaction</i>	F[1,15] = .46; p = .51	F[1,15] = 6.03; p = .03

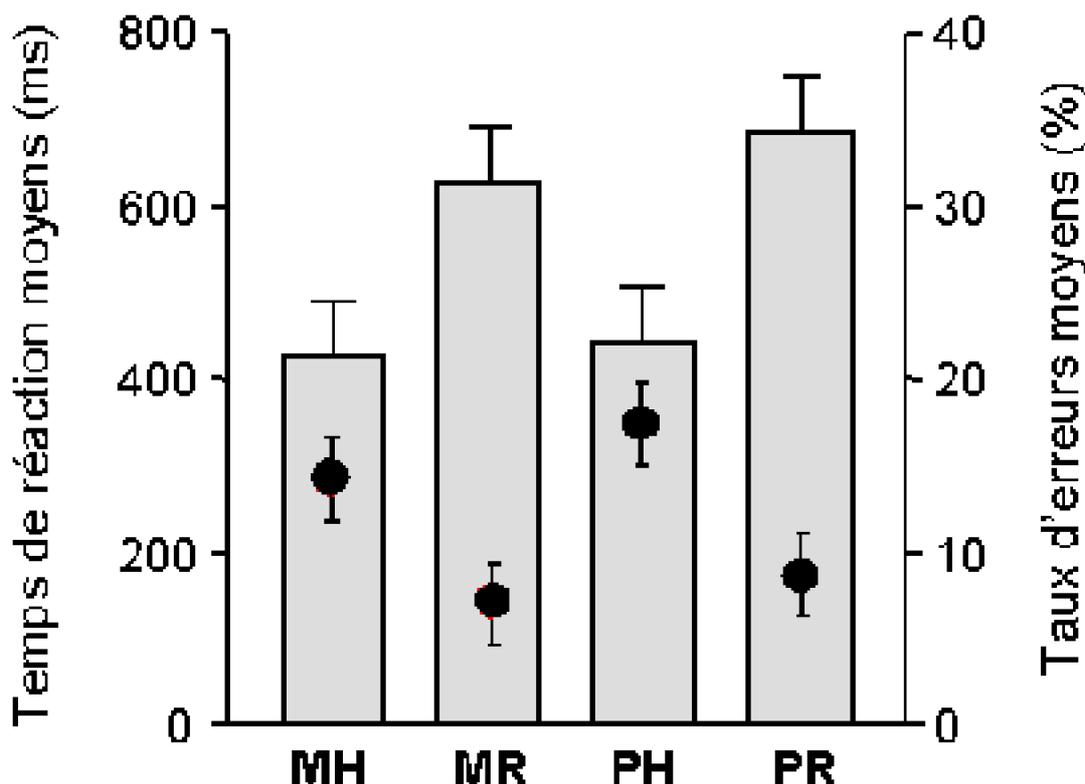


Figure 5.2 : Résultats comportementaux. MH correspond à la condition 'Mot/Hold' ; MR correspond à la condition 'Mot/Release' ; PH correspond à la condition 'Pseudo-mot/Hold' ; PR correspond à la condition 'Pseudo-mot/Release'. Les histogrammes représentent les temps de réaction moyens et les cercles indiquent les taux d'erreurs moyens. Les barres d'erreurs indiquent les erreurs standard. Les temps de réaction sont comptés, pour la condition 'Hold', à partir de la latence de 720 ms (voir le paragraphe C.4. pour explication).

Les taux d'erreurs sont significativement plus faibles pour la catégorie cible 'Mot' que pour la catégorie cible 'Pseudo-mot'. Ils sont aussi significativement plus faibles en condition 'Release' plutôt que 'Hold'.

Les temps de réaction (TR) sont significativement plus courts pour la catégorie cible 'Mot' plutôt que 'Pseudo-mot', et significativement plus courts en condition 'Hold' plutôt que 'Release'. L'interaction entre ces deux effets révèle que l'avantage de la catégorie cible 'Mot' sur la catégorie 'Pseudo-mot' n'est pas significatif en condition 'Hold' : l'analyse post-hoc (*test de Scheffé*) révèle en effet que tous les TR sont significativement différents

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

deux à deux, sauf entre les conditions MH et PH ($p = .61$). La différence entre les conditions MR et PR est significative à $p = .002$.

Les conditions 'Mots/Hold' et 'Pseudo-mots/Hold' comprennent chacune deux "sous-conditions", à savoir Mmm *versus* Mmp d'une part et Ppp *versus* Ppm d'autre part : si le premier item est congruent avec la cible (le sujet stocke l'information lexicale en mémoire de travail et maintient son attention ; condition 'Hold'), le second item peut être congruent ou non avec cette même cible.

Ainsi, nous avons complété notre étude des résultats comportementaux en comparant les taux d'erreurs et les temps de réaction des conditions Mmm, Mmp, Ppp et Ppm. Ces résultats complémentaires sont présentés figure 5.3, les résultats statistiques étant reportés dans le tableau ci-dessous. Les facteurs analysés sont la catégorie cible (correspondant à la catégorie du premier item de la paire ; 'Mot' *versus* 'Pseudo-mot') et la congruence du second item avec la catégorie cible ('Congruence' *versus* 'Incongruence').

Figure 5.3 : Résultats comportementaux. Mmm correspond à la condition 'cible Mot/Congruence du second item' ; Mmp correspond à la condition 'cible Mot/Incongruence du second item' ; Ppp correspond à la condition 'cible Pseudo-mot/Congruence du second item' ; Ppm correspond à la condition 'cible Pseudo-mot/Incongruence du second item'. Les histogrammes représentent les temps de réaction moyens et les cercles indiquent les taux d'erreurs moyens. Les barres d'erreurs indiquent les erreurs standard. Les temps de réaction sont comptés à partir de la latence de 720 ms (voir le paragraphe C.4. pour explication).

	% d'erreurs	Temps de réaction
<i>effet de catégorie cible</i>	$F[1,15] = 8.50; p = .01$	$F[1,15] = 2.45; p = .14$
<i>effet de congruence</i>	$F[1,15] = 21.35; p = .0003$	$F[1,15] = 175.91; p < 10^{-6}$
<i>interaction</i>	$F[1,15] = 2.57; p = .13$	$F[1,15] = .63; p = .44$

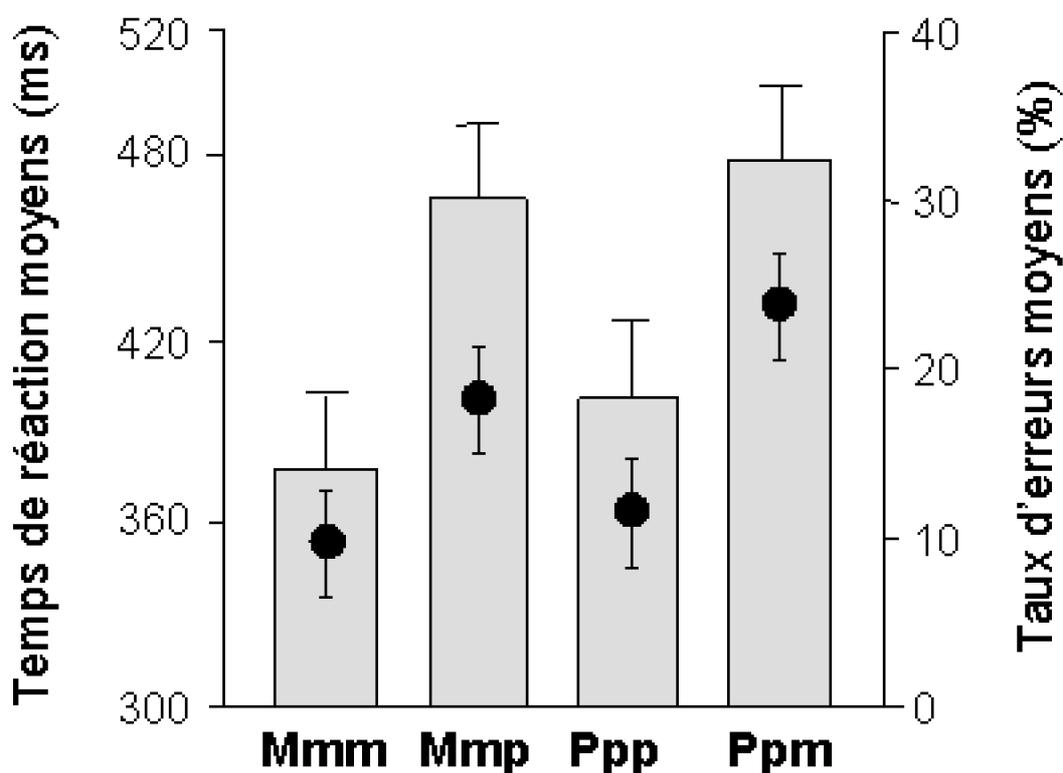


Figure 5.3 : Résultats comportementaux. Mmm correspond à la condition 'cible Mot/Congruence du second item' ; Mmp correspond à la condition 'cible Mot/Incongruence du second item' ; Ppp correspond à la condition 'cible Pseudo-mot/Congruence du second item' ; Ppm correspond à la condition 'cible Pseudo-mot/Incongruence du second item'. Les histogrammes représentent les temps de réaction moyens et les cercles indiquent les taux d'erreurs moyens. Les barres d'erreurs indiquent les erreurs standard. Les temps de réaction sont comptés à partir de la latence de 720 ms (voir le paragraphe C.4. pour explication).

Les taux d'erreurs sont significativement plus faibles pour la catégorie cible 'Mot' que pour la catégorie cible 'Pseudo-mot'. Ils sont aussi significativement plus faibles en condition de 'Congruence' du second item avec la cible plutôt qu'en condition d'Incongruence'. Les deux facteurs n'interagissent pas.

Les temps de réaction (TR) sont significativement plus courts en condition de 'Congruence' du second item avec la cible plutôt qu'en condition d'Incongruence'. Les deux facteurs n'interagissent pas.

D.2. Présentation générale des résultats de PE

La figure 5.4 révèle deux événements majeurs, observés dans les régions pariéto-occipitales (événements P1 et N1 ; cf. flèches rouges sur la figure 5.4), auxquels s'ajoute un événement centro-pariétal (P300 ; cf. flèches bleues). De plus, dans la même région centro-pariétale on observe une dérive négative de potentiels entre la P300 et l'apparition du second item de la paire, en condition 'Hold' et pas en condition 'Release'

(dans la fenêtre temporelle [600 – 800] ms ; cf. flèche verte).

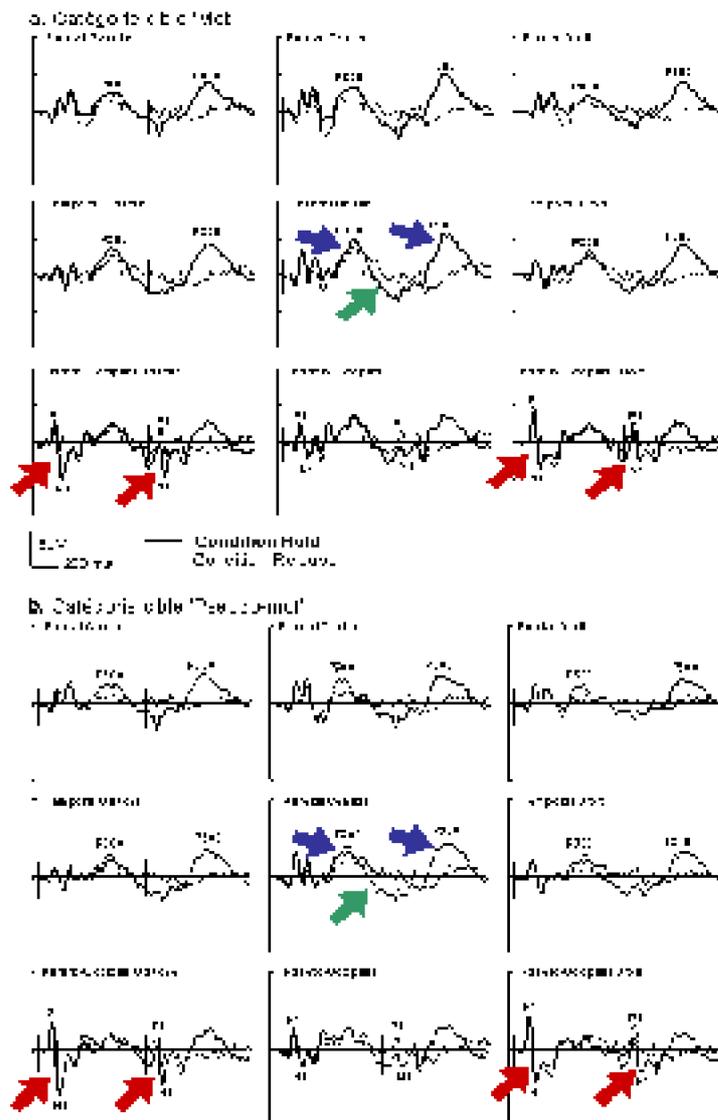


Figure 5.4 : Résultats de Potentiels Evoqués pour 9 régions principales du scalp (Frontal Gauche ; Frontal Central ; Frontal Droit ; Temporal Gauche ; Pariétal Central ; Temporal Droit ; Pariéto-Occipital Gauche ; Pariéto-Occipital ; Pariéto-Occipital Droit ; voir figure 3a du chapitre 4 pour la localisation des régions d'intérêt). **a.** Catégorie cible 'Mot'. **b.** Catégorie cible 'Pseudo-mot'. Comparaison, pour chaque région du scalp, des conditions 'Hold' (trait plein) et 'Release' (pointillés). Les deux barres verticales sur les axes représentent les délais d'apparition des deux stimuli d'une paire. Pour les deux catégories cible, 3 pics principaux sont observés (P1, N1 et P300) pour les deux conditions attentionnelles.

D.3. Analyse 1 : PE après présentation du premier item

Dans cette première analyse, nous avons étudié les effets de cible et de congruence,

après présentation du premier item d'une paire. Nous avons étudié trois évènements électrophysiologiques précis : la P1, la N1 et la P300.

cible	item 1	attention	item 2
M	m	Hold	m
			p
	p	Release	m
			p
P	m	Release	m
			p
	p	Hold	m
			p

Tableau descriptif de l'analyse 1 : l'effet cible (violet versus rouge) et l'effet congruence (translucide versus coloré) sont testés après présentation du premier item d'une paire.

Les facteurs des ANOVAs sont :

- la cible, '**Mot**' (M) ou '**Pseudo-mot**' (P) – comparaison des conditions [Mmm, Mmp, Mpm, Mpp] *versus* [Pmm, Pmp, Ppm, Ppp].
- la congruence, '**Congruence**' (C) ou '**Non congruence**' (NC) – comparaison des conditions [Mmm, Mmp, Ppm, Ppp] *versus* [Mpm, Mpp, Pmm, Pmp].
- l'hémisphère d'enregistrement, '**Gauche**' (G) ou '**Droit**' (D).

Evènement P1

Le premier évènement (P1) a une latence moyenne de 93 ±12 ms. Ce pic est significativement plus ample dans la région pariéto-occipitale droite que gauche. Sa latence et son amplitude moyenne ne sont affectées ni par la cible ni par la congruence, comme l'indiquent les résultats statistiques répertoriés dans le tableau ci-dessous (voir aussi le pic P1 sur la figure 5.5).

P1	Latence	Amplitude moyenne
<i>effet de cible</i>	F[1,15] = .35; p = .57	F[1,15] = .86; p = .37
<i>effet de congruence</i>	F[1,15] = .65; p = .43	F[1,15] = 3.9; p = .07
<i>effet d'hémisphère</i>	aucun résultat ⁴⁴	F[1,15] = 9.11; p = .009

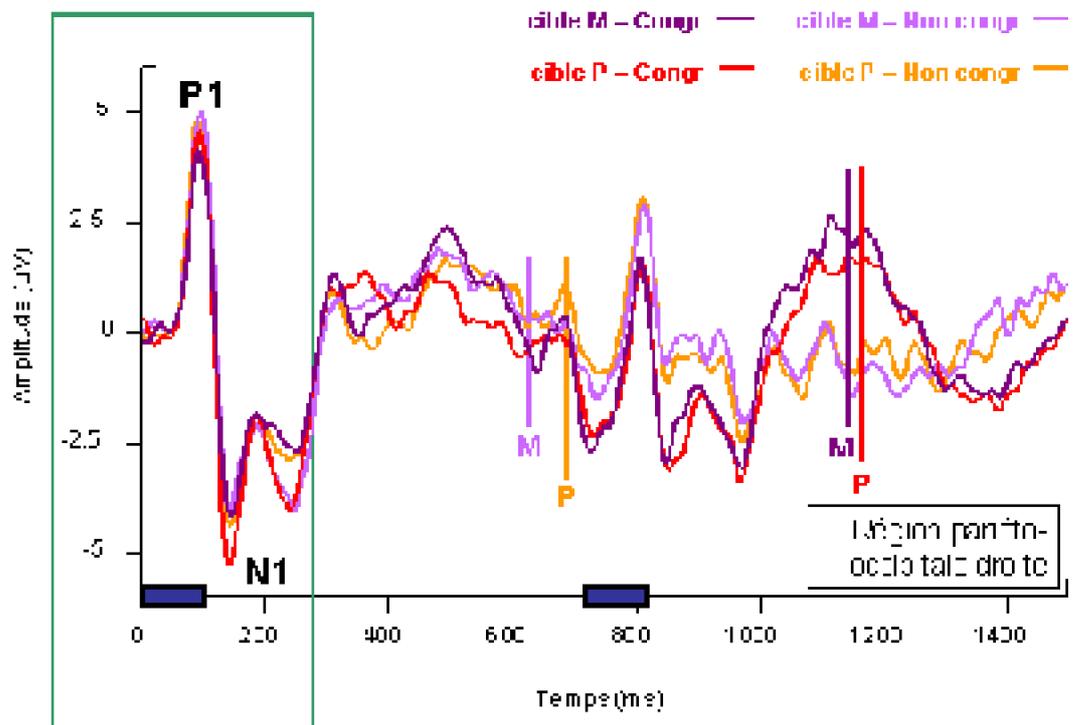
Figure 5.5 : a. Topographie des deux principaux évènements observés, dans la

⁴⁴ La latence d'un pic est définie au niveau d'une électrode de référence, puis appliquée à toutes les électrodes (pour plus de détail sur cette technique, voir le chapitre 3 ; paragraphe C.4.a). Ainsi, aucun effet d'hémisphère ne peut être mesuré sur les latences des pics, ces latences étant identiques pour chacune des 64 électrodes.

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

région pariéto-occipitale droite, pour chaque catégorie cible, dans les contextes 'Congruence' et 'Non congruence'. **b.** PE mesurés dans la région pariéto-occipitale droite (dérivation linéaire des électrodes O2, P6, PO4, PO8), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende. Les PE dans la région pariéto-occipitale gauche sont équivalents, mise à part l'onde P1 significativement moins ample. Les conditions 'Non congruence' correspondent à la condition d'attention 'Release' (courbes mauve et orange) alors que les deux conditions 'Congruence' correspondent à la condition d'attention 'Hold' (courbes violette et rouge).

P1	Latence	Amplitude moyenne
effet de cible	$F(1,15) = 16; p = 0.002$	$F(1,15) = 18; p = 0.001$
effet de congruence	$F(1,15) = 12.5; p = 0.003$	$F(1,15) = 3.3; p = 0.08$
état hémisphère	aucun résultat ^{##}	$F(1,15) = 5.11; p = 0.034$



Evènement N1

L'évènement N1 apparaît à 139 ± 12 ms en moyenne. Ce pic est indépendant de tout effet

de cible, de congruence ou d'hémisphère (voir figure 5.5).

Evènement P300

La P300 est maximale dans la région centro-pariétale, à 467 ± 45 ms en condition de congruence, et à 497 ± 59 ms en condition de non congruence du premier item de la paire avec la catégorie cible. Sa latence est significativement affectée par la congruence mais pas par la cible. Son amplitude moyenne est influencée par ces deux facteurs : la P300 est plus ample lorsqu'il y a congruence de l'item avec la catégorie cible (plutôt qu'incongruence) et lorsque cette catégorie cible est celle des 'Mots' (plutôt que 'Pseudo-mots') sans que l'interaction entre ces deux facteurs n'atteigne le seuil de significativité même si l'on voit que l'amplitude la plus basse tend nettement à être observée pour la condition 'cible Pseudo-mots – Non congruence' (figure 5.6)⁴⁵.

Figure 5.6 : PE mesurés dans la région centro-pariétale (dérivation linéaire des électrodes C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende. Les conditions 'Non congruence' correspondent à la condition d'attention 'Release' (courbes mauve et orange) alors que les deux conditions 'Congruence' correspondent à la condition d'attention 'Hold' (courbes violette et rouge).

P300	Latence	Amplitude moyenne
<i>effet de cible</i>	$F[1,15] = 1.76; p = .20$	$F[1,15] = 5.05; p = .04$
<i>effet de congruence</i>	$F[1,15] = 5.11; p = .04$	$F[1,15] = 10.35; p = .006$
<i>Interaction</i>	$F[1,15] = 1.86; p = .19$	$F[1,15] = 4.22; p = .06$

⁴⁵ Les effets d'hémisphère ne sont pas testés pour l'évènement P300, puisque ce pic est maximal pour les électrodes centrales.

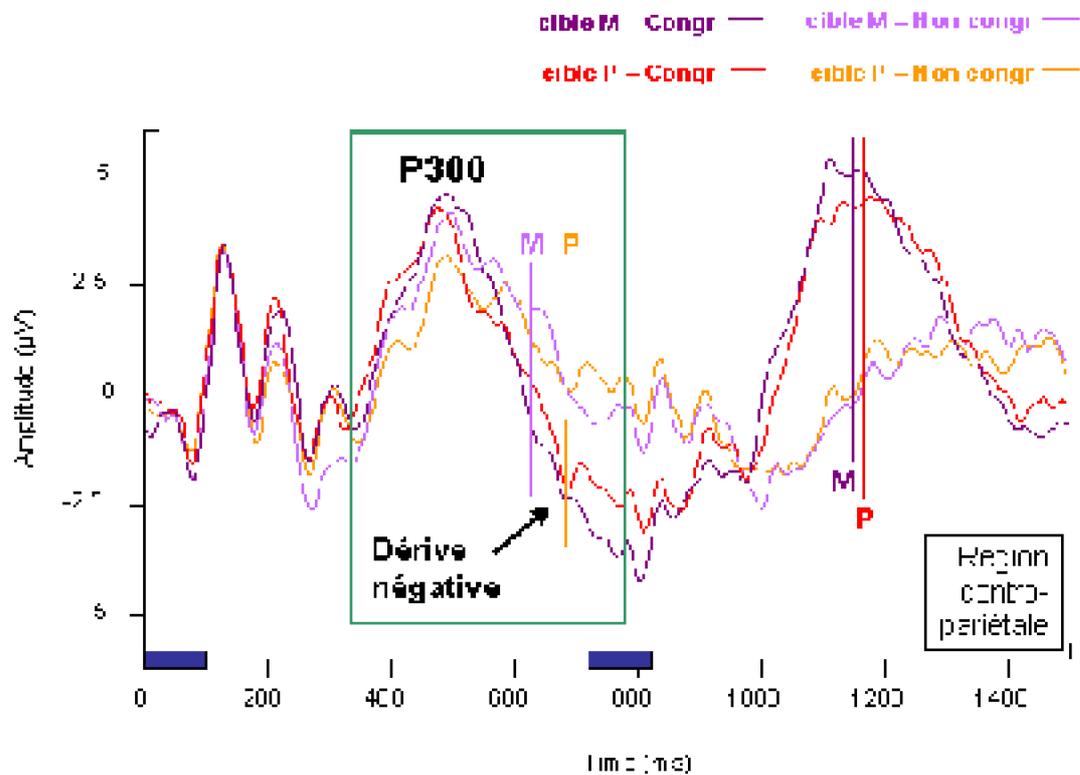


Figure 5.6 : PE mesurés dans la région centro-pariétale (dérivation linéaire des électrodes C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende. Les conditions 'Non congruence' correspondent à la condition d'attention 'Release' (courbes mauve et orange) alors que les deux conditions 'Congruence' correspondent à la condition d'attention 'Hold' (courbes violette et rouge).

Nous observons par ailleurs sur la figure 5.6 une dérive négative de potentiel entre l'onde P300 et la présentation du second item de la paire, dans le cas où le premier item est congruent avec la cible (condition 'Hold' où le sujet maintient son attention pour traiter le second item de la paire).

Nous avons analysé cette dérive négative par ANOVA : nous avons testé les amplitudes moyennes de tracés dans l'intervalle [600 – 780] ms, sur les électrodes C1,

CP1, Cz, CPz, C2, CP2. Cette étude a été restreinte à l'amplitude moyenne, sans prendre la latence en considération, puisqu'il s'agit d'étudier une dérive de potentiel et non pas un pic. Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Dérive négative	Amplitude moyenne
<i>effet de cible</i>	F[1,15] = 4.88; p = .04
<i>effet de congruence</i>	F[1,15] = 34.47; p = .000 03
<i>Interaction</i>	F[1,15] = 2.09; p = .17

La dérive négative de potentiel précédent l'affichage du second item d'une paire est significativement plus ample pour la catégorie cible 'Mot' plutôt que 'Pseudo-mot'. De plus, elle est plus ample si le premier item est congruent avec la cible – donc si le sujet maintient son attention pour traiter le second item – plutôt que s'il est incongruent – et que le sujet relâche son attention et peut prendre sa décision sans traiter le second item.

Après présentation du premier item d'une paire :

- **Le traitement est indépendant de la catégorie cible et de la congruence de l'item avec cette catégorie cible, dans les 150 premières ms suivant la présentation (au niveau du complexe P1/N1).**

- **La P300 est retardée et moins ample s'il y a incongruence entre l'item et la catégorie cible (quelle que soit la catégorie cible). Cette onde est aussi moins ample si les paires de pseudo-mots sont les cibles plutôt que les paires de mots.**

- **La P300 plus ample pour les cibles 'Mot' et en cas de congruence entre cible et stimulus est suivie d'une forte dérive négative de potentiel jusqu'à la présentation du second item de la paire.**

D.4. Analyse 2 : PE après présentation du second item, en condition de maintien d'attention

Dans cette seconde analyse, nous avons étudié les effets de cible et de congruence, après présentation du second item d'une paire, en condition de maintien de l'attention (condition 'Hold', i.e. le premier item de la paire était congruent avec la cible). Nous avons étudié les trois mêmes événements électrophysiologiques que dans l'analyse précédente : la P1, la N1 et la P300, que nous nommerons P1', N1' et P300' pour les distinguer des mêmes événements apparaissant après présentation du premier item.

cible	item 1	attention	item 2
M	m	Hold	m
	p	Release	p
P	m	Release	m
	p	Hold	p

Tableau descriptif de l'analyse 2 : l'effet cible (violet versus rouge) et l'effet congruence (translucide versus coloré) sont testés après présentation du second item d'une paire.

Les facteurs des ANOVAs sont :

- la cible, '**Mot**' (M) ou '**Pseudo-mot**' (P) – comparaison des conditions [Mmm, Mmp] versus [Ppm, Ppp].
- la congruence, '**Congruence**' (C) ou '**Non congruence**' (NC) – comparaison des conditions [Mmm, Ppp] versus [Mmp, Ppm].
- l'hémisphère d'enregistrement, '**Gauche**' (G) ou '**Droit**' (D).

Evènement P1'

Le premier évènement (P1') a une latence moyenne de 84 ±12 ms. Sa latence et son amplitude moyenne ne sont affectées ni par la cible ni par la congruence, comme l'indiquent les résultats statistiques répertoriés dans le tableau ci-dessous (voir aussi le pic P1' sur la figure 5.7).

P1'	Latence	Amplitude moyenne
effet de cible	F[1,15] = 2.47; p = .14	F[1,15] = .08; p = .78
effet de congruence	F[1,15] = .32; p = .58	F[1,15] = .007; p = .94
effet d'hémisphère	aucun résultat ⁴⁶	F[1,15] = 2.26; p = .15

Evènement N1'

L'évènement N1' apparaît à 131 ±12 ms en moyenne pour la catégorie cible 'Mot', et à 134 ±12 ms en moyenne pour la catégorie cible 'Pseudo-mot'. Sa latence est significativement plus faible en condition cible 'Mot' plutôt que 'Pseudo-mot'. Son amplitude est indépendante de tout effet de cible, de congruence ou d'hémisphère (voir

⁴⁶ Aucun effet d'hémisphère ne peut être mesuré sur les latences des pics, ces latences étant identiques pour chacune des 64 électrodes.

figure 6).

Figure 5.7 : a. Topographie des deux principaux évènements observés, dans la région pariéto-occipitale droite, pour chaque catégorie cible, dans les contextes 'Congruence' et 'Non congruence'. b. PE mesurés dans la région pariéto-occipitale droite (dérivation linéaire des électrodes O2, P6, PO4, PO8), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende. Dans la légende, 'M – Congr' correspond à la condition Mmm (violet) ; 'M – Non congr' correspond à Mmp (mauve) ; 'P – Congr' correspond à Ppp (rouge) et 'P – Non congr' correspond à Ppm (orange).

N1'	Latence	Amplitude moyenne
effet de cible	$F[1,15] = 6.17; p = .03$	$F[1,15] = .44; p = .52$
effet de congruence	$F[1,15] = .00; p = .95$	$F[1,15] = .22; p = .64$
effet d'hémisphère	aucun résultat	$F[1,15] = 1.94; p = .18$

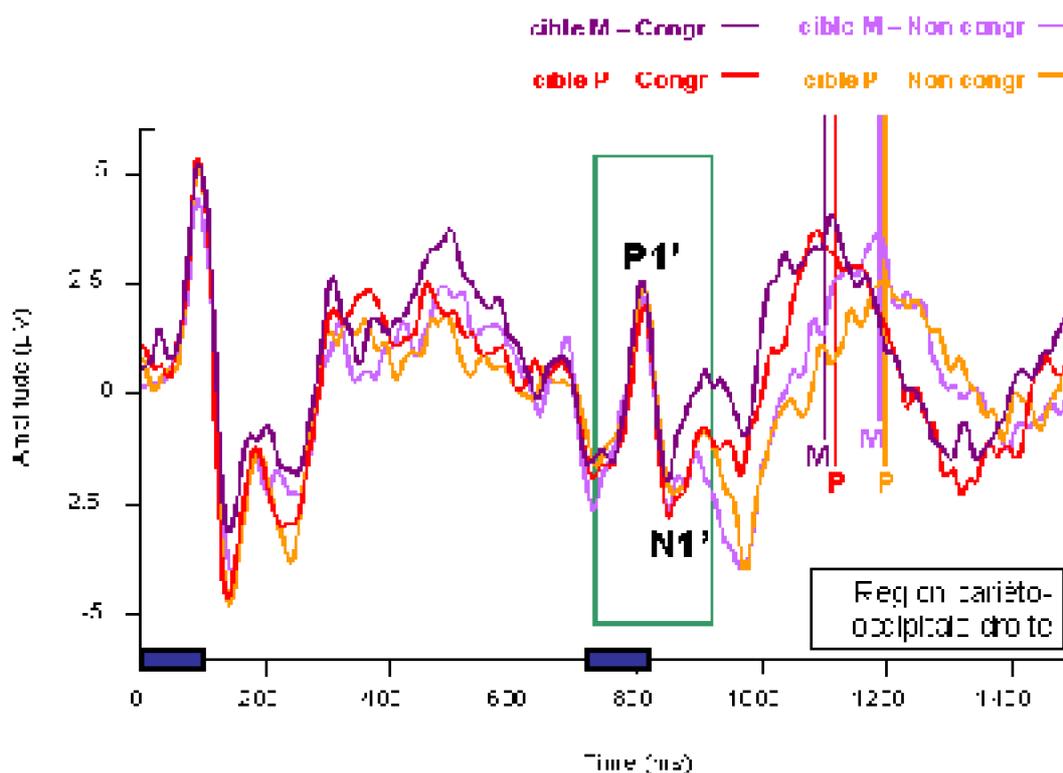


Figure 5.7 : a. Topographie des deux principaux évènements observés, dans la région pariéto-occipitale droite, pour chaque catégorie cible, dans les contextes 'Congruence' et 'Non congruence'. b. PE mesurés dans la région pariéto-occipitale droite (dérivation linéaire des électrodes O2, P6, PO4, PO8), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les

couleurs des barres faisant référence à la légende. Dans la légende, 'M – Congr' correspond à la condition Mmm (violet) ; 'M – Non congr' correspond à Mmp (mauve) ; 'P – Congr' correspond à Ppp (rouge) et 'P – Non congr' correspond à Ppm (orange).

Evènement P300'

La P300' est maximale dans la région centro-pariétale, à 420 ±63 ms en condition de congruence, et à 480 ±66 ms en condition de non congruence du second item de la paire avec la catégorie cible (sachant que le premier item était congruent).

Sa latence est affectée par la congruence mais pas par la cible. Son amplitude moyenne est indépendante de ces deux facteurs (figure 5.8).

Il faut noter que cette onde P300' est observée sur le tracé de potentiels alors que le processus de décision a déjà eu lieu, puisque les temps de réponse sont enregistrés simultanément à cet évènement. Cette onde n'est donc probablement pas une P300 'classique' reflétant une prise de décision, comme pour la P300 observée après présentation du premier item.

Figure 5.8 : PE mesurés dans la région centro-pariétale (dérivation linéaire des électrodes C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende. Dans la légende, 'M – Congr' correspond à la condition Mmm (violet) ; 'M – Non congr' correspond à Mmp (mauve) ; 'P – Congr' correspond à Ppp (rouge) et 'P – Non congr' correspond à Ppm (orange).

P300'	Latence	Amplitude moyenne
<i>effet de cible</i>	F[1,15] = .68; p = .42	F[1,15] = 3.71; p = .07
<i>effet de congruence</i>	F[1,15] = 16.62; p = .001	F[1,15] = .02; p = .89
<i>Interaction</i>	F[1,15] = 4.09; p = .06	F[1,15] = 2.40; p = .14

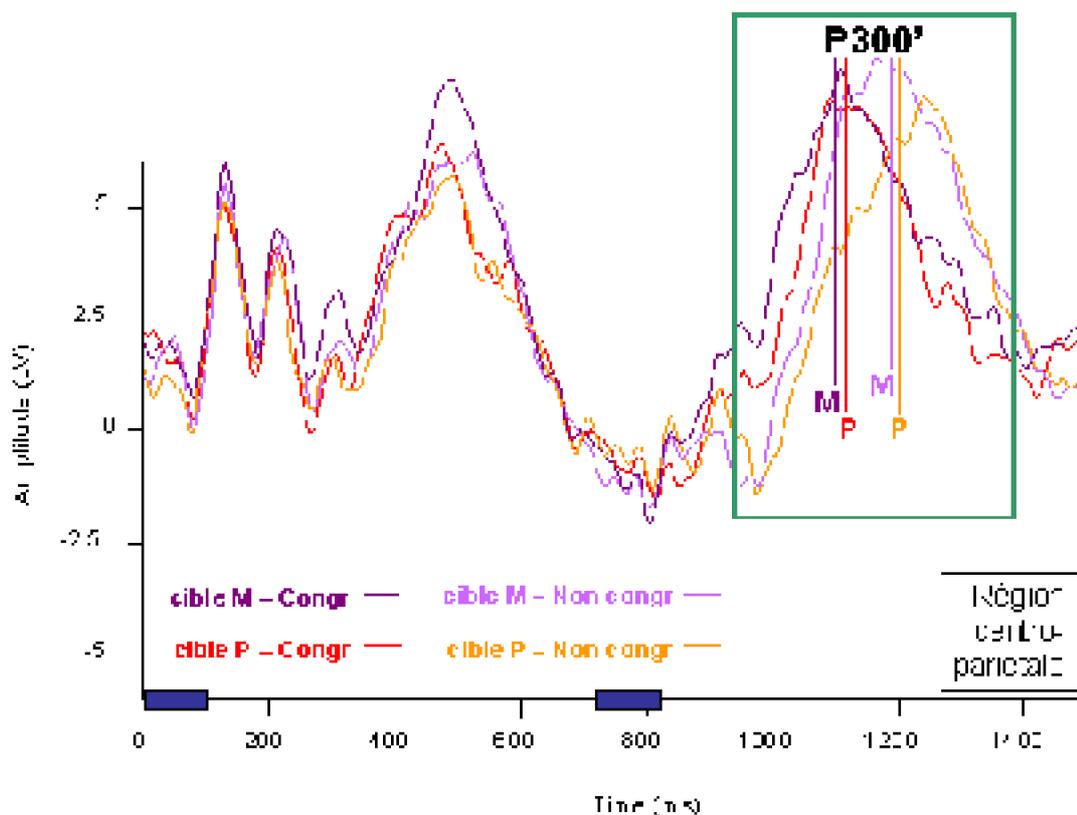


Figure 5.8 : PE mesurés dans la région centro-pariétale (dérivation linéaire des électrodes C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende. Dans la légende, 'M - Congr' correspond à la condition Mmm (violet) ; 'M - Non congr' correspond à Mmp (mauve) ; 'P - Congr' correspond à Ppp (rouge) et 'P - Non congr' correspond à Ppm (orange).

Après présentation du second item d'une paire (lorsque le premier item était congruent avec la cible et que le sujet a donc maintenu son attention) :

- La P1 est toujours indépendante de la catégorie cible et de la congruence de l'item avec cette catégorie cible.
- La N1 est plus précoce lorsque les cibles sont les paires de mots, alors qu'elle était indépendante de ce facteur après présentation du premier item.
- La P300 est toujours retardée s'il y a incongruence entre l'item et la catégorie cible (quelle que soit la catégorie cible). Son amplitude n'est plus dépendante des facteurs cible et congruence comme elle l'était après présentation du premier item.

D.5. Analyse 3 : PE après présentation du second item, en fonction du maintien ou du relâchement de l'attention

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

Dans cette dernière analyse, nous avons étudié les effets de cible et de soutien d'attention, après présentation du second item d'une paire, selon que le sujet ait maintenu son attention (condition 'Hold', i.e. le premier item de la paire était congruent avec la catégorie cible, le sujet doit traiter le second item pour prendre sa décision) ou bien relâché son attention (condition 'Release', i.e. le premier item de la paire était incongruent avec la catégorie cible, le sujet ne doit pas nécessairement traiter le second item pour répondre). Nous avons à nouveau étudié les trois mêmes événements électrophysiologiques : la P1, la N1 et la P300, que nous nommerons P1'', N1'' et P300''.

cible	item 1	attention	item 2
M	m	Hold	m
	p	Release	p
P	m	Release	m
	p	Hold	p

Tableau descriptif de l'analyse 3 : l'effet cible (violet versus rouge) et l'effet de soutien de l'attention (translucide versus coloré) sont testés après présentation du second item d'une paire.

Les facteurs des ANOVAs sont :

- la cible, '**Mot**' (M) ou '**Pseudo-mot**' (P) – comparaison des conditions [Mmm, Mmp, Mpm, Mpp] *versus* [Pmm, Pmp, Ppm, Ppp].
- le soutien de l'attention, '**Hold**' (H) ou '**Release**' (R) – comparaison des conditions [Mmm, Mmp, Ppm, Ppp] *versus* [Mpm, Mpp, Pmm, Pmp].
- l'hémisphère d'enregistrement, '**Gauche**' (G) ou '**Droit**' (D).

Évènement P1''

Le premier événement (P1'') a une latence moyenne de 85 ± 12 ms. Sa latence et son amplitude moyenne ne sont affectées ni par la cible ni par le soutien d'attention, comme l'indiquent les résultats statistiques répertoriés dans le tableau ci-dessous (voir aussi le pic P1'' sur la figure 5.9).

Figure 5.9 : a. Topographie des deux principaux événements observés, dans la région pariéto-occipitale droite, pour chaque catégorie cible, dans les contextes 'Congruence' et 'Non congruence'. b. PE mesurés dans la région pariéto-occipitale droite (dérivation linéaire des électrodes O2, P6, PO4, PO8), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement

vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende.

P1''	Latence	Amplitude moyenne
effet de cible	F[1,15] = .002; p = .96	F[1,15] = .10; p = .75
effet de soutien d'attention	F[1,15] = 3.74; p = .07	F[1,15] = 3.29; p = .09
effet d'hémisphère	aucun résultat ⁴⁷	F[1,15] = 1.73; p = .21

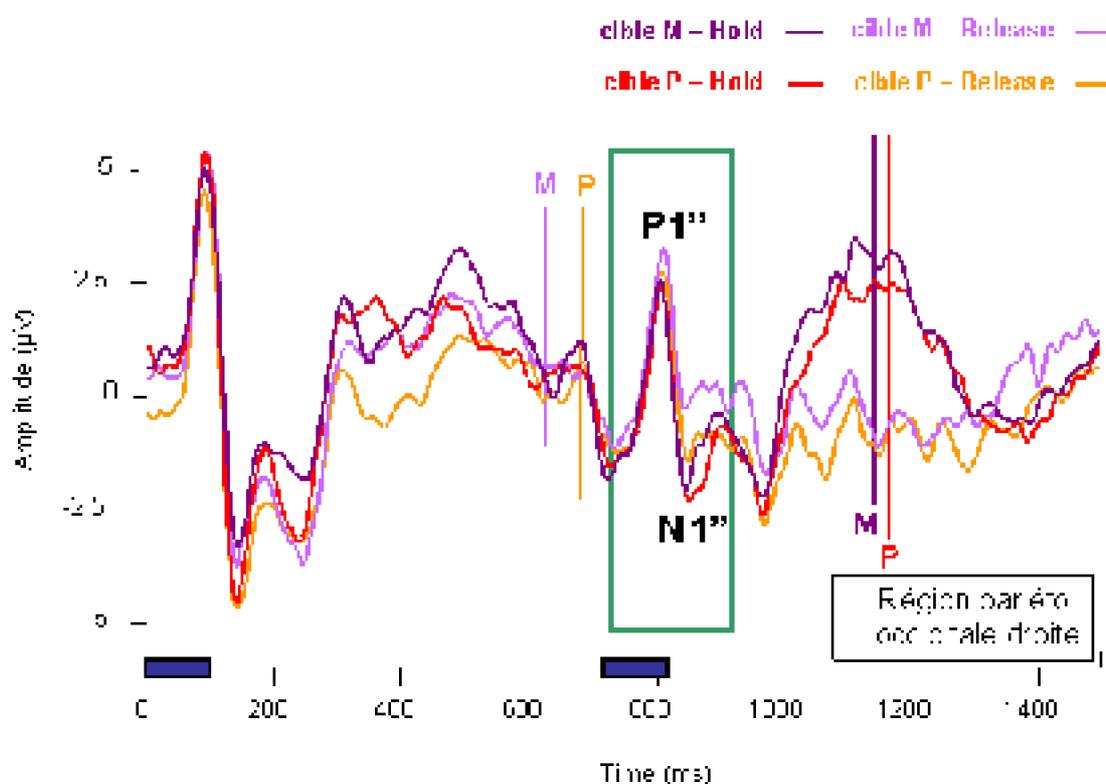


Figure 5.9 : a. Topographie des deux principaux évènements observés, dans la région pariéto-occipitale droite, pour chaque catégorie cible, dans les contextes 'Congruence' et 'Non congruence'. b. PE mesurés dans la région pariéto-occipitale droite (dérivation linéaire des électrodes O2, P6, PO4, PO8), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont

⁴⁷ Aucun effet d'hémisphère ne peut être mesuré sur les latences des pics, ces latences étant identiques pour chacune des 64 électrodes.

matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende.

Evènement N1''

L'évènement N1'' apparaît à 133 ± 13 ms en moyenne pour la condition 'Hold', et à 139 ± 15 ms en moyenne pour la condition 'Release'. Cette onde est significativement retardée et moins ample en condition 'Release' par rapport à la condition 'Hold' (voir figure 5.9). Elle est indépendante de la catégorie cible.

N1''	Latence	Amplitude moyenne
<i>effet de cible</i>	$F[1,15] = 3.15; p = .10$	$F[1,15] = 1.85; p = .19$
<i>effet de soutien d'attention</i>	$F[1,15] = 6.11; p = .03$	$F[1,15] = 3.54; p = .04$
<i>effet d'hémisphère</i>	aucun résultat	$F[1,15] = 1.61; p = .22$

Evènement P300''

La P300'' est maximale dans la région centro-pariétale. Sa latence n'est pas étudiée dans cette analyse, puisqu'elle n'a pas réellement de signification : en effet, le pic P300 n'est pas observé en condition 'Release', il est donc difficile d'étudier une latence de pic pour cette condition d'attention (voir figure 5.10).

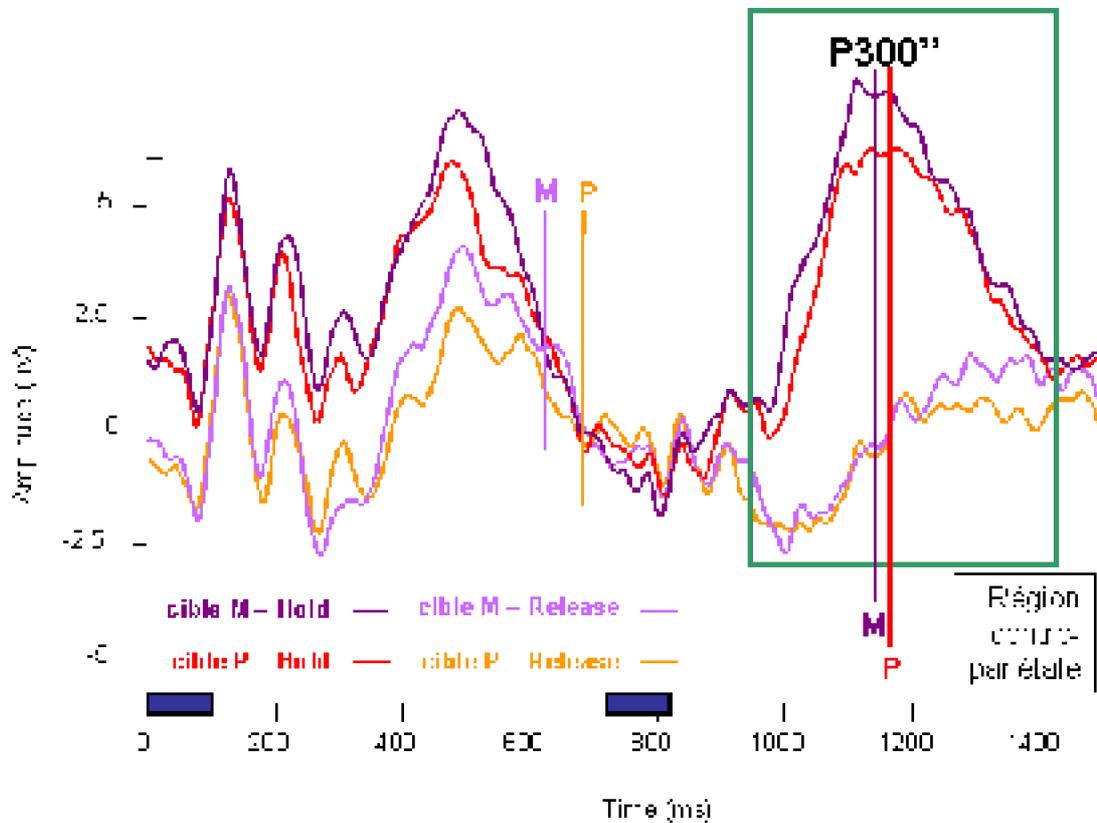


Figure 5.10 : PE mesurés dans la région centro-pariétale (dérivation linéaire des électrodes C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende.

L'amplitude moyenne de l'onde P300'' est indépendante de la catégorie cible. Cette onde est bien sûr très significativement moins ample en condition 'Release' par rapport à la condition 'Hold' (figure 5.10) en raison de l'absence de cette onde dans cette dernière condition.

P300''	Amplitude moyenne
effet de cible	F[1,15] = 1.71; p = .21
effet de soutien d'attention	F[1,15] = 79.21; p < 10 ⁻⁶
Interaction	F[1,15] = 2.14; p = .16

Après présentation du second item d'une paire, selon que le sujet a maintenu son attention (condition 'Hold') ou non (condition 'Release'), nous observons que :

- La P1 est indépendante de la catégorie cible et du soutien de l'attention.**
- La N1 est indépendante de la catégorie cible. Elle est moins ample et retardée en condition 'Release' par rapport à la condition 'Hold'.**
- La P300 est inexistante en condition de relâchement de l'attention, indépendamment de la catégorie cible.**

E. Discussion

Nous avons analysé les effets de soutien d'attention, d'attention sélective et de congruence sur le traitement de séquences de lettres dans deux contextes expérimentaux très différents (après présentation du premier ou du second item d'une paire).

Lorsqu'il doit traiter le premier item d'une paire, le sujet doit réaliser une décision lexicale dans une situation 'complexe' : (1) il doit être attentif à l'affichage d'un item à l'écran, dont le délai de présentation après la réponse précédente est variable de 2 à 3 secondes. (2) Le sujet va devoir – selon la catégorie de l'item traité et la consigne – ou bien prendre la décision de déclencher une réponse (condition 'Release'), ou bien inhiber et différer sa réponse, et maintenir l'information relative au premier item en mémoire de travail.

Si le sujet a maintenu son attention après présentation d'un premier item congruent avec la catégorie cible (condition 'Hold'), il se trouve pour la suite de la tâche – i.e. le traitement du second item – dans un contexte 'facilitateur', pour plusieurs raisons :

- (1) le délai entre la présentation du premier et du second item est constant.
- (2) Le sujet doit réaliser une décision lexicale simple, prendre une décision et répondre dans tous les cas.
- (3) Le sujet a précédemment réalisé un traitement lexical sur le premier item, ce qui le place dans un contexte favorable pour réaliser une nouvelle décision lexicale.
- (4) S'il existe bien une charge en mémoire de travail durant le délai d'attente avant la présentation du second item (cf. dérive négative de potentiel), cette charge permet aussi la préparation de la réponse en fonction de la nature du second item qui sera présenté. Ceci induit une prise de décision "accélérée" après l'affichage du second stimulus, assimilable à un effet d'amorçage du traitement du second item par le maintien en mémoire du premier.

Ainsi, nous allons comparer les effets des différents facteurs étudiés, en contexte de tâche 'facilitée' ou non. Ce contexte facilitateur est, ou non, présent selon qu'il existe un "amorçage en mémoire de travail" du traitement lexical.

E.1. Effet de l'*attention sélective* sur la réalisation de la tâche de décision lexicale

E.1.a. Effet de l'*attention sélective* sur le complexe P1/N1

Le complexe P1/N1 est indépendant de l'attention sélective (voir analyse 1). Ainsi, l'attention sélective portée sur les mots ou les pseudo-mots n'influence pas leurs traitements respectifs dans les 150 premières ms après présentation de l'item.

Les latences et topographies de ces deux ondes correspondent à celles des évènements P1 et N1 classiquement décrits dans la littérature (Cornelissen et al., 2003; Pammer et al., 2004; Tarkiainen et al., 2002). Comme nous l'avons présenté dans notre problématique, nous sommes partis de l'hypothèse que l'onde P1 reflétait le traitement des traits visuels d'une séquence de lettres, alors que l'onde N1 refléterait la phase de traitement des lettres de la séquence. Ainsi, l'attention sélective n'aurait pas d'influence sur le traitement des mots et des pseudo-mots lors des phases d'analyse des traits visuels et des lettres.

La P1 peut être influencée par des effets "Top-down" attentionnels pour des stimuli simples, tels que des objets, des visages et des photos d'animaux (Taylor, 2002). Contrairement à nos attentes, il semble qu'elle ne le soit pas dans cette expérience pour des stimuli formés de séquences de lettres.

Par ailleurs, dans le cadre particulier de cette tâche, l'attention sélective portée sur les mots – par exemple – pourrait ne pas influencer le traitement des lettres composant ce mot. Ceci peut sembler contradictoire avec nos attentes, ainsi qu'avec les résultats obtenus dans l'expérience testant les effets "Top-down lexicaux" (voir chapitre 4) : nous avons conclu de notre étude précédente que le traitement des lettres d'un mot était influencé par le lexique mental. En supposant que l'attention sélective portée sur les mots induise une 'pré-activation' du lexique mental, nous supposons que cette attention sélective influence le stade de traitement des lettres d'un mot – par l'intermédiaire du lexique mental. Deux hypothèses peuvent expliquer ce résultat :

(1) Tout d'abord, la tâche est d'une grande complexité. Les sujets débutent un essai en devant réaliser une décision lexicale sur un stimulus, qui selon sa nature et selon la consigne, les mèneront à répondre immédiatement ou à différer leur décision après le traitement d'un second stimulus. Il se peut que cette tâche soit trop complexe pour permettre à l'attention sélective de produire – par l'intermédiaire du lexique mental – une influence significative sur le traitement des lettres des mots et pseudo-mots.

(2) L'autre hypothèse est que l'attention sélective n'induit pas de pré-activation du lexique mental, ou bien une pré-activation de ce lexique identique pour les cibles 'Mots' et 'Pseudo-mots', du fait que ces derniers sont très proches orthographiquement de mots réels. En effet, dans cette étude, mots et pseudo-mots pourraient induire un accès au lexique, ce contexte expérimental étant différent de celui de l'étude précédente dans laquelle les mots étaient comparés à des non-mots, clairement non candidats à l'accès lexical.

Nous pouvons privilégier la première hypothèse grâce aux résultats obtenus dans la seconde analyse : dans un 'contexte facilitateur' (lors du traitement du second item d'une paire, i.e. avec amorçage en mémoire de travail du traitement lexical), l'onde N1 est légèrement mais significativement plus précoce lorsque les cibles sont les mots plutôt que les pseudo-mots. Deux facteurs importants sont à prendre en compte pour discuter de ce nouveau résultat :

(1) les conditions pour lesquelles le stade de traitement des lettres est plus précoce sont celles pour lesquelles le premier item de la paire était un mot (et coïncidait avec la catégorie cible ; conditions Mmm et Mmp). Il existe donc pour ces deux conditions un contexte particulier : l'attention sélective est portée sur les mots, et un item 'Mot' vient d'être traité. Le contexte particulier créé par le traitement lexical précédent pourrait favoriser l'influence "Top-down" du lexique mental, qui n'était pas 'suffisante' dans le contexte précédent (après présentation du premier item d'une paire).

(2) De plus, après présentation du second item d'une paire, les sujets n'ont plus à différer leur prise de décision, ils ont une décision lexicale classique à réaliser, avec nécessairement prise de décision et réponse. Cette situation de tâche moins complexe pourrait aussi faciliter les effets de l'attention sélective.

Les deux hypothèses ne sont pas exclusives, et il faut probablement prendre les deux en compte pour expliquer l'effet facilitateur de l'attention sélective observé sur le traitement des lettres des items présentés en seconde et non pas en première position d'une paire. Toutefois, ce résultat suggère que l'attention sélective peut influencer le stade de traitement des lettres d'une séquence, ce qui est concordant avec les données de la littérature (Fink et al., 1996; Frith and Dolan, 1997). Ainsi, *"la focalisation d'attention sur un certain type de stimuli induit une modification de la réponse neurale dans les aires cérébrales spécialisées dans l'analyse de ce type précis de stimuli"* (Frith and Dolan, 1997).

Pour finir, il est intéressant de noter que l'effet facilitateur de l'attention sélective portée sur les mots influence de manière équivalente le traitement des mots et des pseudo-mots (effet d'attention sélective, pas d'effet de congruence et pas d'interaction ; voir l'analyse 2). Ainsi, il semble bien que l'attention sélective pour la catégorie 'Mot' induise une pré-activation du lexique mental. Ce lexique mental produit ensuite des effets "Top-down" facilitateurs sur le stade de traitement des lettres d'un mot, ou d'un pseudo-mot (ressemblant orthographiquement à un mot).

E.1.b. Effet de l'attention sélective sur l'onde P300

L'amplitude de la P300 est connue pour refléter la quantité de ressources attentionnelles allouées au traitement d'un stimulus (Kramer and Strayer, 1988; Wickens et al., 1983), alors que sa latence reflèterait le temps requis pour la catégorisation du stimulus (Kutas et al., 1977; McCarthy and Donchin, 1981; Polich, 1986).

La latence de la P300 ne varie en fonction de l'attention sélective dans aucune des trois analyses. Ainsi, l'attention sélective portée sur une catégorie cible particulière ne modifie en rien le temps de catégorisation des différents items d'une paire. La pré-activation du lexique mental – pour la catégorie cible 'Mot' – ne permet pas de

catégoriser plus vite les items que l'absence de pré-activation du lexique. On peut supposer que (1) la tâche est trop complexe pour que les effets facilitateurs soient significatifs ; (2) l'attention sélective n'induit pas d'effet facilitateur – par l'intermédiaire de la pré-activation du lexique mental – sur le temps de catégorisation ; (3) les temps de catégorisation enregistrés sont déjà trop rapides pour pouvoir être améliorés par des effets attentionnels facilitateurs.

L'onde P300 est moins ample pour la catégorie cible 'Pseudo-mot', lors du traitement du premier item d'une paire. Cet effet n'est pas observé lors du traitement du second item d'une paire. L'interprétation de ce résultat est similaire à celle des effets observés sur le complexe P1/N1. Les conditions expérimentales sont plus favorables lors du traitement du second item d'une paire plutôt que du premier, ce qui entraîne : (1) un effet facilitateur de l'attention sélective portée aux mots, au stade de traitement des lettres ; (2) une charge attentionnelle nécessaire à la catégorisation des stimuli équivalente avec ou sans attention sélective.

Ces observations sont concordantes avec le postulat de Luck & Hillyard (Luck and Hillyard, 1999) : dans les conditions complexes de réalisation de la tâche – après présentation du premier item – l'attention sélective influence la charge attentionnelle allouée à la tâche. Dans des conditions expérimentales 'facilitées', les 'distracteurs' ne gênent plus la réalisation du traitement, la charge attentionnelle ne sera alors plus modulée par l'attention sélective.

Nous pouvons noter par ailleurs que l'onde P300 après présentation du second item d'une paire est maximale pendant que la réponse est donnée par le sujet (et non pas avant la réponse, comme après présentation du premier item). Il est possible que cette onde ne soit pas fonctionnellement assimilable à l'onde P300 observée après le premier item d'une paire.

A l'inverse, il est possible que les deux ondes P300 reflètent bien le même phénomène, qui soit à ce moment-là indépendant de la prise de décision et de la réponse. L'onde P300 pourrait alors refléter la mise à jour de l'information en mémoire de travail (voir (Croft et al., 2003)).

Une recherche de localisation de source ainsi qu'une étude de la corrélation entre les temps de réaction et les amplitudes de P300 permettraient de définir si les deux ondes P300 observées après premier ou second item d'une paire reflètent ou non la même activité fonctionnelle.

Dans un contexte expérimental 'complexe', l'attention sélective allouée à une catégorie cible modifie la charge attentionnelle nécessaire à la catégorisation des stimuli.

Si le contexte de la tâche devient plus favorable – i.e. avec amorçage du traitement lexical en mémoire de travail –, l'attention sélective n'a plus d'influence sur la charge attentionnelle. Par contre, si cette attention sélective est portée sur la catégorie des mots (et qu'il y a donc pré-activation du lexique mental), elle a un effet "Top-down" facilitateur au niveau du stade de traitement des lettres des séquences présentées.

Quelle que soit la complexité de la tâche, l'attention sélective n'influe pas sur le traitement des traits visuels des mots et des pseudo-mots.

E.2. Effet de la *congruence* sur la réalisation de la tâche de décision lexicale

E.2.a. Effet de la congruence sur le complexe P1/N1

La congruence d'un item avec la catégorie cible n'a aucune influence sur le complexe P1/N1, que ce soit pour le traitement d'un item en première ou seconde position d'une paire (voir analyses 1 et 2).

Ce résultat est tout à fait en accord avec notre hypothèse selon laquelle le complexe P1/N1 reflète les stades de traitement des traits visuels et des lettres d'une séquence. En effet, la congruence d'un item avec une catégorie cible ne peut avoir d'influence qu'après identification de cet item (en temps que mot ou pseudo-mot, et donc en temps qu'item congruent ou non avec celle des deux catégories qui est cible). Ainsi, les 150 premières ms suivant la présentation d'un stimulus ne suffisent pas à le catégoriser comme mot ou pseudo-mot (Fiebach et al., 2002), et correspondent donc probablement au temps nécessaire pour traiter les traits visuels et les lettres de ce stimulus.

E.2.b. Effet de la congruence sur l'onde P300

L'onde P300 est retardée lorsqu'un item est incongruent avec la catégorie cible, que cet item soit le premier ou le second d'une paire. Ainsi, le temps de catégorisation d'un stimulus est augmenté en situation incongruente, quelle que soit la charge en mémoire de travail.

La ressource attentionnelle allouée à un stimulus est plus faible si ce stimulus est incongruent avec la catégorie cible que s'il est congruent. Ceci est observé uniquement dans un contexte 'complexe' (traitement du premier item). Nous avons vu précédemment que, lors d'un 'allègement' de la tâche (traitement du second item), la quantité de ressource attentionnelle nécessaire à la catégorisation des stimuli est équivalente avec ou sans attention sélective. Nous pouvons ajouter qu'elle est aussi indépendante, dans ces conditions particulières, de la congruence ou de l'incongruence de l'item avec la catégorie sur laquelle l'attention sélective était portée.

Comme pour l'attention sélective, la congruence d'un stimulus avec la catégorie cible n'influence la charge attentionnelle que lorsque la tâche est complexe. Ces deux facteurs n'influencent plus sur les ressources attentionnelles dans un contexte avec amorçage du traitement lexical en mémoire de travail.

Le temps de catégorisation d'un stimulus est augmenté en situation d'incongruence avec la cible, quelle que soit la difficulté de la tâche.

Les stades de traitement des traits visuels et des lettres d'une séquence ne sont pas influencés par la congruence de la séquence de lettres avec la catégorie cible, puisque la catégorisation n'a pas eu lieu à ce stade de l'analyse.

E.3. Effet du *soutien de l'attention* sur la réalisation de la tâche de décision lexicale

E.3.a. Effet du soutien de l'attention sur le complexe P1/N1

L'onde P1 est indépendante du soutien de l'attention : que les sujets portent une attention soutenue à la stimulation (ayant besoin de traiter le second item pour prendre une décision) ou qu'ils relâchent leur attention (ayant suffisamment d'information pour prendre leur décision et répondre sans avoir à traiter le second item), l'onde P1 a sensiblement la même latence et la même amplitude moyenne. Ainsi, cette onde reflète un traitement parfaitement automatisé, qui survient environ 100 ms après présentation d'une séquence de lettres, que le sujet traite volontairement l'information ou non.

L'évènement N1 est observé en condition de relâchement de l'attention. Par contre, à l'inverse de la P1, cette onde est alors retardée et moins ample. Ainsi, l'onde N1 reflète un traitement (1) automatique, qui intervient avec ou sans analyse volontaire de l'information ; mais (2) ce traitement semble moins intense et retardé si le sujet n'est pas attentif à la stimulation.

E.3.b. Effet du soutien de l'attention sur l'onde P300

L'onde P300 est absente du tracé de potentiel après présentation d'un item qu'il n'est pas nécessaire de traiter au cours de la tâche. Ce résultat est donc conforme avec les nombreux travaux ayant établi que la P300 reflète un traitement entièrement dépendant de l'attention.

Ce résultat montre bien que les sujets se conforment aux instructions découlant du paradigme : ils ne traitent pas intentionnellement le second item d'une paire, lorsque l'identification du premier item suffit à prendre une décision. L'absence de P300 en condition de relâchement d'attention découle vraisemblablement de l'absence de traitement volontaire et de prise de décision explicite sur l'item.

Nous pouvons aussi interpréter cette observation comme résultant d'un 'blink attentionnel' : on voit, entre autre sur la figure 5.10, que les réponses des sujets en condition de relâchement de l'attention (conditions 'cible M – Release' et 'cible P – Release) sont enregistrées entre 40 et 100 ms avant l'apparition du second stimulus des paires. Il se peut qu'au moment de l'apparition du second item, les sujets soient focalisés sur leur premier traitement, leur prise de décision et leur réponse motrice, et subissent donc un 'blink attentionnel' par rapport au second item qui ne peut pas être traité (n'ayant pas bénéficié de l'attention du sujet au moment de sa présentation à l'écran) (Raymond et al., 1992; Vogel et al., 1998). Nos résultats concordent avec ceux de Vogel et al. (Vogel et al., 1998) qui observent une suppression de l'onde P300 en condition de 'blink attentionnel', sans modification du complexe P1/N1 (voir aussi les expériences sur la 'période réfractaire psychologique' ; (Luck, 1998)).

Seules les composantes P1 et N1 se développent dans le cas d'un relâchement

d'attention, et sont donc les corrélats de traitements purement automatisés et indépendants des décisions conscientes du sujet.

E.4. Observations complémentaires

Après présentation du premier item d'une paire, et maintien en mémoire de cet item pour différer la prise de décision (condition 'Hold'), la mémoire de travail est fortement sollicitée. Ceci est confirmé par l'observation faite – dans la première analyse – d'une dérive négative entre l'onde P300 et la présentation du second item. Cette dérive négative de potentiel est significativement plus ample en condition de maintien d'attention (*versus* relâchement) et plus ample lorsque les cibles sont les mots (*versus* pseudo-mots).

Elle est interprétable, sur le plan électrophysiologique, comme une CNV ('Contingent Negative Variation') (McEvoy et al., 1998; Rugg, 1984) et sur le plan cognitif comme un engagement de la mémoire de travail : en condition de maintien d'attention dans l'attente du traitement du second item de la paire, le premier item est stocké en mémoire de travail pendant le délai inter-stimuli. Cette activité a déjà été décrite pour des tâches linguistiques testées en Potentiels Evoqués (Naatanen et al., 1992; Thierry et al., 2003a; Thierry et al., 1998; Thierry et al., 2003b). Cette dérive correspondrait à une activité neuronale bilatérale dans le cortex pré-frontal inférieur (BA46), modulée par la charge en mémoire de travail (Caplan et al., 2000; Thierry et al., 2003b).

Les différentes analyses réalisées révèlent par ailleurs que les trois facteurs attentionnels étudiés n'interagissent jamais : aucune interaction significative entre les facteurs n'est obtenue dans chacune des trois analyses. Les facteurs étudiés (1) ont des effets significatifs à différents niveaux d'analyses ; (2) sont dépendants de la difficulté de la tâche ; (3) peuvent avoir dans certaines circonstances des effets additifs ; (4) mais n'ont jamais d'effets opposés.

Ainsi, bien que les effets attentionnels testés soient divers, leurs influences couplées sont toujours complémentaires, et jamais inverses.

E.5. Résultats comportementaux

Les résultats comportementaux peuvent être interprétés au vu des différentes observations faites sur les résultats de PE.

Lorsque le sujet prend sa décision et répond après la présentation du premier item d'une paire (condition 'Release'),

- les résultats de PE suggèrent que l'attention sélective influe – par pré-activation du lexique mental – sur la charge attentionnelle et la catégorisation. Seuls ces derniers stades de traitement des séquences sont influencés, et aucun effet "Top-down" attentionnel facilitateur n'est observé au niveau des stades de traitement plus précoces. Ceci implique une prise de décision et une réponse motrice relativement longues.

- les temps de réactions enregistrés en condition 'Release' sont par ailleurs significativement plus courts lorsque les cibles sont les mots plutôt que les pseudo-mots.

Ainsi, l'hypothèse d'une pré-activation du lexique mental par l'attention sélective semble confirmée : lorsque le sujet porte particulièrement son attention sur la catégorie 'Mot', une pré-activation du lexique mental a lieu, ce qui entraîne une catégorisation et une prise de décision plus rapides : pour la condition 'cible Mots', les pseudo-mots sont rejetés plus rapidement que ne le sont les mots en condition 'cible Pseudo-mots'.

Lorsque le sujet ne prend sa décision qu'après présentation du second item (condition 'Hold'), trois phénomènes sont observés, d'après les analyses des PE : (1) l'attention sélective du sujet influence l'analyse dès le stade de traitement des lettres ; (2) un premier traitement lexical a eu lieu quelques millisecondes avant, mettant le sujet dans un contexte favorable au traitement d'une nouvelle séquence ; (3) la mémoire de travail est active. Un de ces trois facteurs ou leur combinaison rend probablement compte des temps de réponse des sujets significativement plus courts qu'en condition 'Release'.

Notons que la diminution des temps de réaction se fait au prix de taux d'erreurs significativement plus importants. Les conditions attentionnelles particulières du sujet lorsqu'il doit prendre sa décision sont très favorables à des réponses rapides, qui se font probablement au prix d'un contrôle moins important de la décision.

Cette augmentation significative du taux d'erreur lorsque la réponse est donnée après le second item d'une paire pourrait aussi être une conséquence – comme la suppression de l'onde P300 – du 'blink attentionnel' produit par le premier item sur le second. En effet, lorsque le délai de présentation entre deux items d'une paire est réduit, les taux d'erreurs et les TR sur le second item augmentent (Luck, 1998; Luck et al., 2000; Vogel et al., 1998). Nous observons dans cette étude des temps de réaction significativement plus courts lorsque la réponse est donnée après le second item plutôt que le premier. Ce résultat contradictoire peut s'expliquer par les différences de complexité de tâche qui influeraient significativement plus sur les TR que le 'blink attentionnel'. Par contre, nous observons bien une augmentation des taux d'erreurs si la réponse est donnée après présentation du second item.

Le traitement du second item pourrait aussi être plus 'laborieux' – et donc entraîner plus d'erreurs – du fait que cet item est difficilement stocké en mémoire de travail, celle-ci étant déjà sollicitée pour le maintien en mémoire de l'information sur le premier item (Luck et al., 2000).

F. Conclusion

Cette étude nous permet de compléter les connaissances que nous avons sur les facteurs influençant les différents stades de traitement des mots :

L'onde P1 reflète une phase de traitement parfaitement automatisée, indépendante – dans le cas de cette étude – du soutien de l'attention du sujet, de l'attention sélective du sujet pour une catégorie cible et de la congruence de l'item traité avec cette catégorie cible. Partant de l'hypothèse que la P1 reflète le stade de traitement des traits visuels d'une séquence de lettres (Tarkiainen et al., 2002), ce traitement est indépendant de tout

phénomène attentionnel.

La seule observation particulière faite sur cet évènement est qu'il est significativement plus ample dans l'hémisphère droit que dans l'hémisphère gauche, ce qui a déjà été observé par Kutas et al. (Kutas et al., 1988), et que nous avons observé aussi dans notre première étude en PE (voir chapitre 4).

L'onde N1 reflèterait la phase de traitement des lettres d'une séquence (Cornelissen et al., 2003; Pammer et al., 2004). Ce traitement est automatique, bien que modulé par le soutien de l'attention du sujet. Cette phase d'analyse peut aussi être modulée par l'attention sélective, mais uniquement lorsque la tâche est 'facilitée' (par amorçage du traitement lexical en mémoire de travail) et qu'un premier traitement lexical a eu lieu précédemment. Enfin, ce traitement n'est pas modulé par la congruence entre le stimulus et la cible.

Ainsi, bien que les activations des différentes phases de traitement se fassent de manière parallèle et distribuée, le traitement des lettres d'un item ne peut plus être influencé par effet "Top-down" attentionnel une fois que l'item est identifié et catégorisé.

Le temps de catégorisation (reflété par la latence de l'onde P300) est indépendant de l'attention sélective du sujet. Par contre, il est fortement dépendant de la congruence de l'item avec la catégorie cible, quelle que soit la difficulté de la tâche.

La "dépense attentionnelle" (reflétée par l'amplitude moyenne de l'onde P300) est indépendante de l'attention sélective portée à une catégorie et de la congruence de l'item avec cette catégorie, lorsque la tâche est 'facilitée'. Si la tâche est plus complexe (sans amorçage du traitement lexical en mémoire de travail), la quantité de ressource attentionnelle allouée deviendra dépendante de ces deux facteurs : la P300 traduit alors une mobilisation attentionnelle maximale quand le sujet doit se placer dans une situation de maintien d'attention, avec les paires de mots pour cibles (avec un effet additif des deux facteurs).

La charge attentionnelle augmentée pour les cibles 'Mots' peut s'expliquer par une activation implicite de la mémoire lexicale (qui ne se fait pas lorsque les sujets sont attentifs aux pseudo-mots) qui nécessite des ressources attentionnelles importantes.

D'autre part, la charge attentionnelle augmentée lorsque le sujet doit maintenir son attention est un résultat attendu. Ce 'rehaussement' de la P300 est suivi pour les deux conditions 'Hold' (premier item congruent avec la cible) d'une dérive négative caractéristique du paradigme utilisé (Thierry et al., 1998). Cette dérive est plus importante en condition 'Hold' que 'Release', ainsi qu'en condition 'cible Mot' plutôt que 'cible Pseudo-mot'. Ainsi, plus la charge attentionnelle (P300) était importante lors du traitement du premier item, plus la dérive négative observée ensuite sera importante. Cette dérive négative reflèterait la charge en mémoire de travail.

Enfin, la charge attentionnelle allouée au traitement d'un stimulus et le temps de catégorisation de ce stimulus sont très fortement dépendants du soutien de l'attention du sujet.

Nous pouvons résumer les principaux effets obtenus dans un schéma de synthèse, présenté figure 5.11.

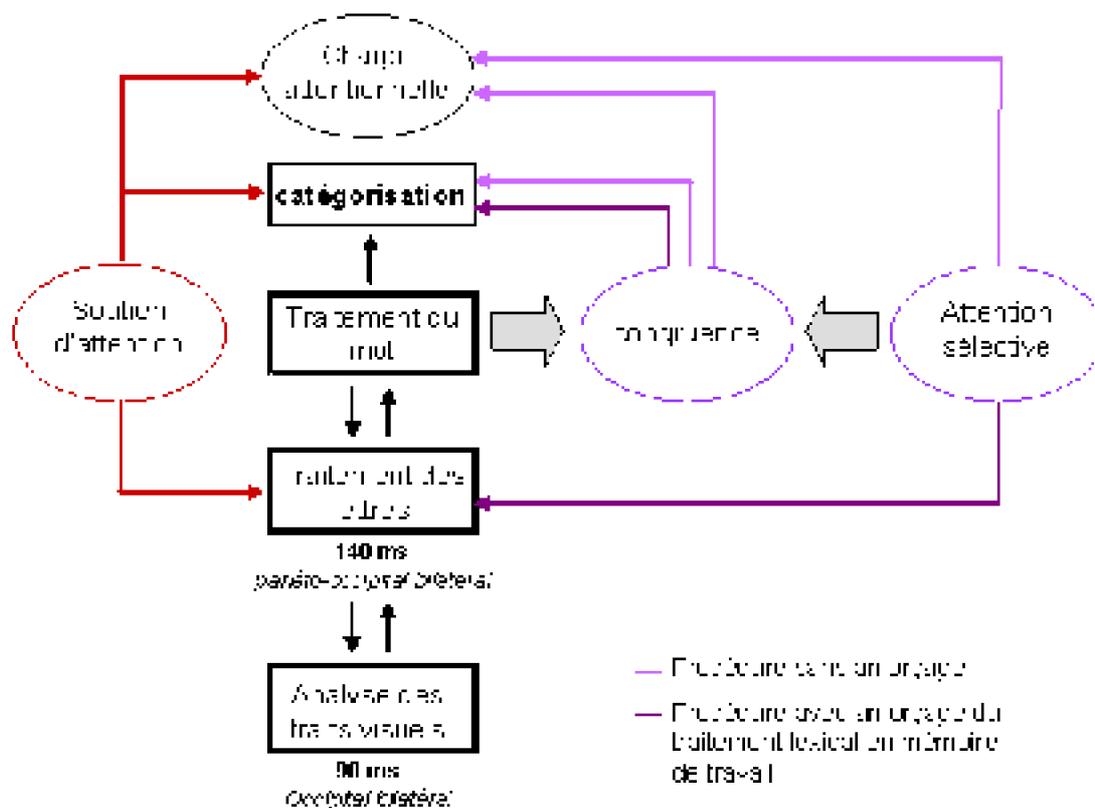


Figure 5.11 : Schéma de synthèse des principaux facteurs observés dans l'étude des effets "Top-down" attentionnels.

Chap 6. Etude des effets "Top-down" lexicaux et attentionnels chez des adultes dyslexiques

A. Introduction

Les résultats d'électrophysiologie présentés dans les chapitres 4 et 5 nous ont permis d'apporter un certain nombre de connaissances sur les effets "Top-down" lexicaux et attentionnels mis en place au cours de la reconnaissance de mots isolés chez des adultes normo-lecteurs.

Nous allons maintenant présenter les résultats obtenus, pour les deux mêmes études, chez des sujets adultes dyslexiques. Ces deux nouvelles expériences nous permettront de préciser l'existence ou non de déficits dans les effets "Top-down" facilitateurs, chez les dyslexiques.

B. Dyslexie et effets "Top-down" lexicaux

B.1. Introduction

L'expérience basée sur le paradigme de Reicher-Wheeler – présentée au chapitre 4 – nous a permis de définir la course temporelle des effets "Top-down" lexicaux au cours d'une tâche d'identification de lettres, ainsi que leur dépendance au facteur de temps de présentation des items : l'évènement électrophysiologique P1 est indépendant du contexte lexical et du temps de présentation (TP) des stimuli. Les effets lexicaux ont leur première incidence sur le tracé électrophysiologique au niveau de la N1, qui est plus ample en contexte 'Mot' que 'Non-mot', uniquement pour un TP de 66 ms. Cet effet "Top-down" facilitateur influençant l'amplitude moyenne de la N1 est majeur lorsque la lettre à identifier est au centre du mot, plutôt qu'aux extrémités.

Deux autres résultats importants ont été obtenus : il semble qu'un traitement lexical ait lieu, dans le contexte 'Mot' pour les deux TP, bien que la tâche soit explicitement d'identifier une lettre cible sans lire la totalité de la séquence de lettres. Enfin, le temps de catégorisation des stimuli est influencé par la lexicalité (les non-mots sont catégorisés plus vite que les mots) et par le TP (la catégorisation des deux types de stimuli est plus rapide pour un TP plus long).

En se basant sur les résultats obtenus dans cette étude par les sujets normo-lecteurs, ainsi que sur les connaissances publiées antérieurement sur 'électrophysiologie et dyslexie' (voir chapitre 1 ; paragraphe E.7), nous avons pu émettre un certain nombre d'hypothèses quant aux résultats attendus chez des sujets dyslexiques réalisant la même étude : les rares études publiées sur le 'Word Superiority Effect' testé chez des sujets dyslexiques révèlent qu'aucun WSE n'est observé dans les données comportementales des dyslexiques (Chase and Tallal, 1990; Grainger et al., 2003)⁴⁸. Nous nous attendons donc à n'observer aucun WSE sur les résultats comportementaux des sujets dyslexiques.

De plus, nous supposons que l'absence de WSE dans les données comportementales reflète un déficit dans les effets "Top-down" lexicaux facilitateurs. Nous supposons donc qu'aucun effet de lexicalité ne sera observé sur l'amplitude de la N1 chez les sujets dyslexiques.

B.2. Matériel et méthodes

B.2.a. Participants

Dix sujets de langue maternelle française ont passé cette expérience (8 hommes et 2 femmes, d'un âge moyen de 25.2 ans \pm 6.3, tous droitiers). Chaque sujet a donné

⁴⁸ Ces deux études révèlent qu'aucun WSE n'est observé dans des populations d'enfants dyslexiques. Nous ne pouvons pas réellement comparer ces résultats à notre étude réalisée chez des sujets dyslexiques adultes. Pourtant, nous utiliserons ces observations comme bases de nos hypothèses puisque aucune étude sur le WSE chez des sujets dyslexiques adultes n'a été publiée à ce jour, à notre connaissance.

préalablement son consentement éclairé pour participer à un protocole de recherche sans bénéfice individuel direct. Ce protocole avait été validé par un comité d'éthique local et assuré par l'INSERM. Tous les sujets avaient par ailleurs une vue normale ou corrigée à la normale.

B.2.b. Stimuli, tâche, acquisition et analyses

L'expérience réalisée sur le groupe de sujets adultes dyslexiques, selon le paradigme de Reicher-Wheeler, est exactement la même que celle présentée dans le chapitre 4, pour des adultes normo-lecteurs (qui formeront le groupe contrôle). Le même paradigme a été utilisé, avec les mêmes stimulations et dans les mêmes conditions d'enregistrement. Ainsi, la section 'Matériel et méthodes' de ce chapitre ne sera pas développée, toute la description ayant été faite dans le paragraphe B.3. du chapitre 4.

B.3. Etude des effets "Top-down" lexicaux toutes positions de lettres confondues

B.3.a. Résultats comportementaux

Les résultats comportementaux sont représentés sur la figure 6.1. L'analyse de variance des taux d'erreurs ne révèle aucun effet significatif de groupe ($F[1, 18] = 3.54$; $p = .08$), un effet significatif de lexicalité ($F[1, 18] = 14.90$; $p = .001$) et une interaction groupe/lexicalité ($F[1, 18] = 5.25$; $p = .03$) significative. L'analyse post-hoc (*test de Scheffé*) montre que les contextes 'Mot' et 'Non-mot' diffèrent significativement chez les sujets témoins ($p = .004$) mais pas chez les sujets dyslexiques ($p = .75$).

Chez les sujets témoins, les taux d'erreurs sont significativement plus faibles pour une identification de lettre dans un mot (taux d'erreur moyen = 14% \pm 18) que dans un non-mots (taux d'erreur moyen = 31% \pm 13). Cet effet de lexicalité ('Word Superiority Effect') précédemment mis en évidence et analysé chez les sujets normo-lecteurs (voir chapitre 4) n'est pas observé chez les sujets dyslexiques : ces derniers identifient les lettres contenues dans des mots avec un taux d'erreur moyen de 31% \pm 4, et les lettres contenues dans des non-mots avec un taux d'erreur moyen de 37% \pm 8.

De plus, il existe un effet significatif de temps de présentation (TP) ($F[1, 18] = 18.20$; $p = .0005$) sans interaction groupe/TP. Les taux d'erreurs sont donc significativement plus faibles pour un TP plus élevé (quel que soit le contexte lexical), pour sujets témoins et dyslexiques.

L'analyse des temps de réaction (TR) ne révèle aucun effet significatif. Nous pouvons noter toutefois que, toutes conditions confondues, les TR des sujets dyslexiques sont plus longs que ceux des sujets témoins, même si cet effet n'est pas significatif ($F[1, 18] = 3.71$; $p = .07$) (voir figure 6.1).

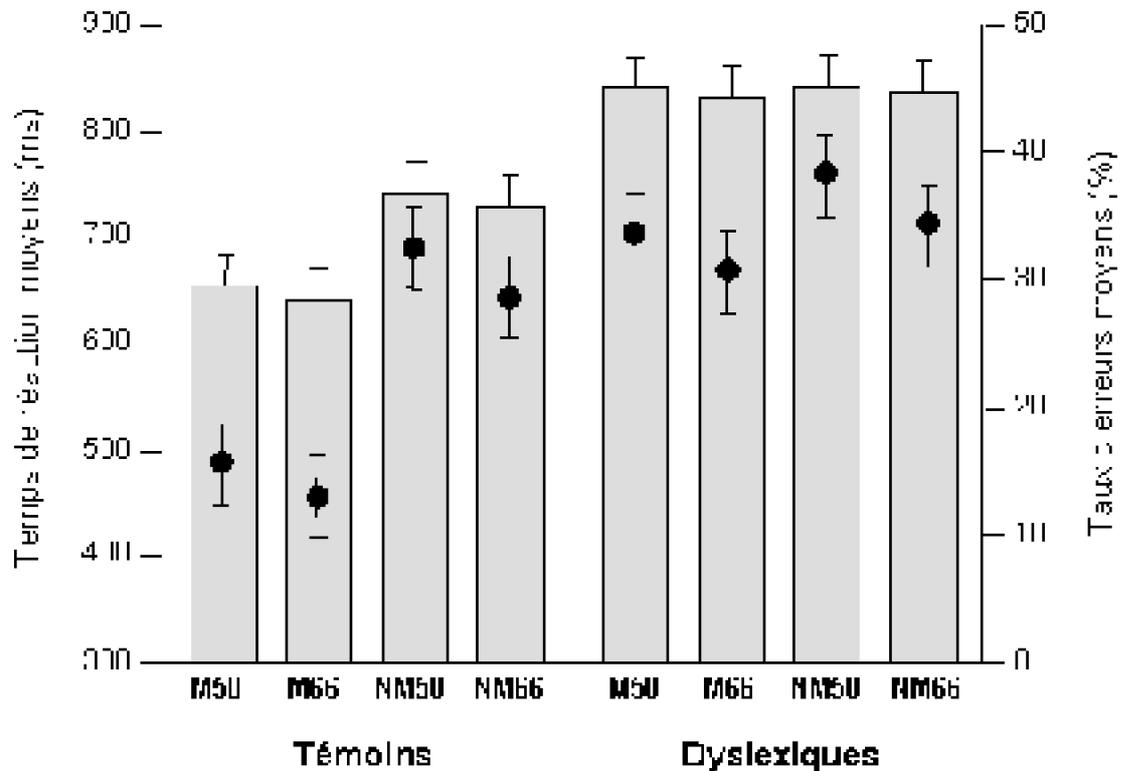


Figure 6.1 : Résultats comportementaux comparatifs des sujets témoins (**gauche**) et dyslexiques (**droite**). M50 correspond à la condition 'Mots' présentés 50 ms ; M66 correspond à la condition 'Mots' présentés 66 ms ; NM50 correspond à la condition 'Non-mots' présentés 50 ms ; NM66 correspond à la condition 'Non-mots' présentés 66 ms. Les histogrammes représentent les temps de réaction moyens et les cercles indiquent les taux d'erreurs moyens. Les barres d'erreurs indiquent les erreurs standard.

B.3.b. Potentiels Evoqués

Les mêmes évènements électrophysiologiques majeurs sont observés chez les sujets dyslexiques par rapport aux sujets témoins, bien que d'importantes différences de latences et d'amplitudes soient observables sur les tracés (voir figure 6.2). Nous comparerons donc statistiquement les principaux pics, entre les deux groupes de sujets : la P1 et la N1 dans les régions pariéto-occipitales (cf. flèches rouges), la P300 dans la région fronto-centrale (cf. flèches bleues), et la N_{Left} dans les régions temporales gauche et droite (cf. flèches vertes).

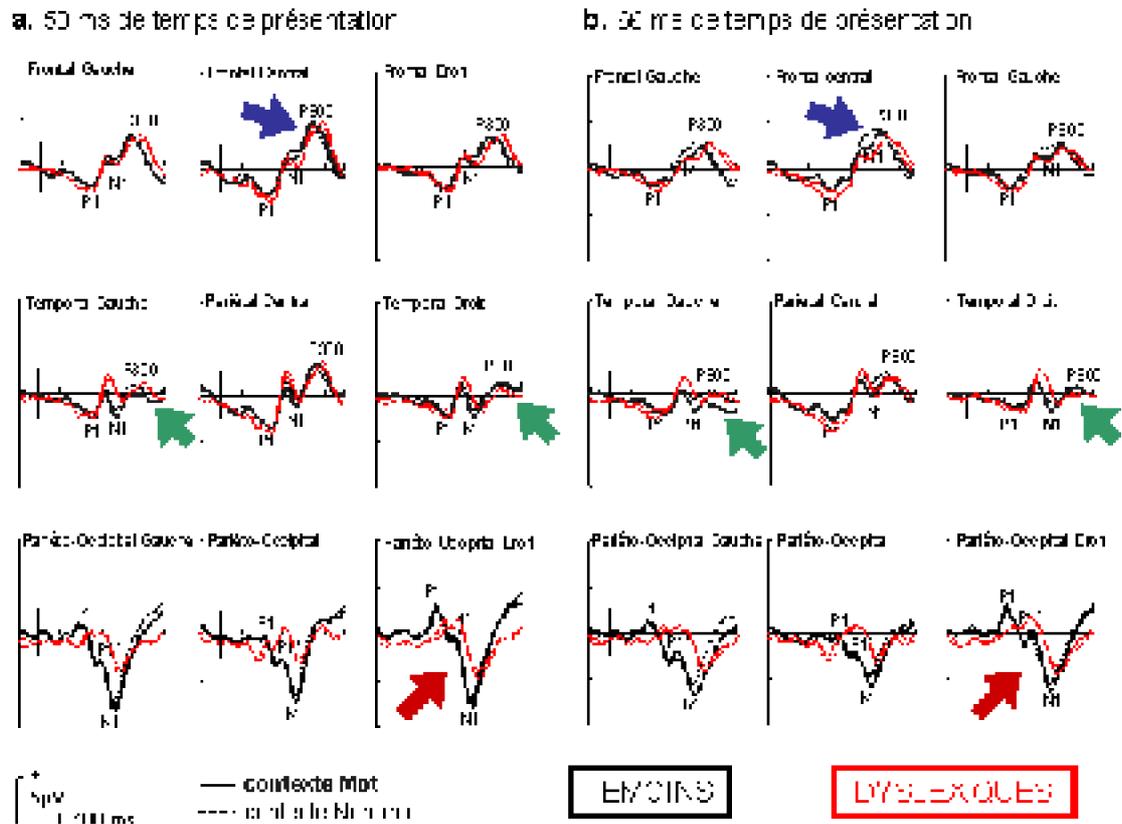


Figure 6.2 : Résultats de Potentiels Evoqués pour 9 régions principales du scalp (Frontal Gauche ; Frontal Central ; Frontal Droit ; Temporal Gauche ; Pariétal Central ; Temporal Droit ; Pariéto-Occipital Gauche ; Pariéto-Occipital ; Pariéto-Occipital Droit). Comparaison des sujets témoins (*tracés noirs*) et des sujets dyslexiques (*tracés rouges*) a. Temps de présentation des stimuli de 50 ms. b. Temps de présentation de 66 ms. Comparaison, pour chaque région du scalp, des contextes Mot (trait plein) et Non-mot (pointillés). Des divergences majeures de tracés sont observés entre les deux groupes de sujets, principalement dans les régions pariéto-occipitales.

Evènement P1

Le premier évènement (P1) a une latence moyenne de 99 ± 13 ms chez les sujets témoins, et de 107 ± 13 ms chez les sujets dyslexiques. Ce pic est significativement plus ample dans la région pariéto-occipitale droite que gauche. Sa latence et son amplitude moyenne ne sont affectées ni par la lexicalité ni par le TP, pour les deux groupes de sujets. Bien que la P1 ait tendance à être retardée et moins ample pour le groupe de

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

sujets dyslexiques par rapport au groupe contrôle, aucun effet significatif de groupe n'est obtenu par analyse de variance (voir figure 6.3).

P1	Latence	Amplitude moyenne
effet de groupe	F[1,18] = 1.90; p = .18	F[1,18] = .13; p = .73
effet de lexicalité	F[1,18] = 4.35; p = .052	F[1,18] = .83; p = .37
effet de TP	F[1,18] = .01; p = .94	F[1,18] = 1.92; p = .18
effet d'hémisphère	aucun résultat	F[1,18] = 8.22; p = .01

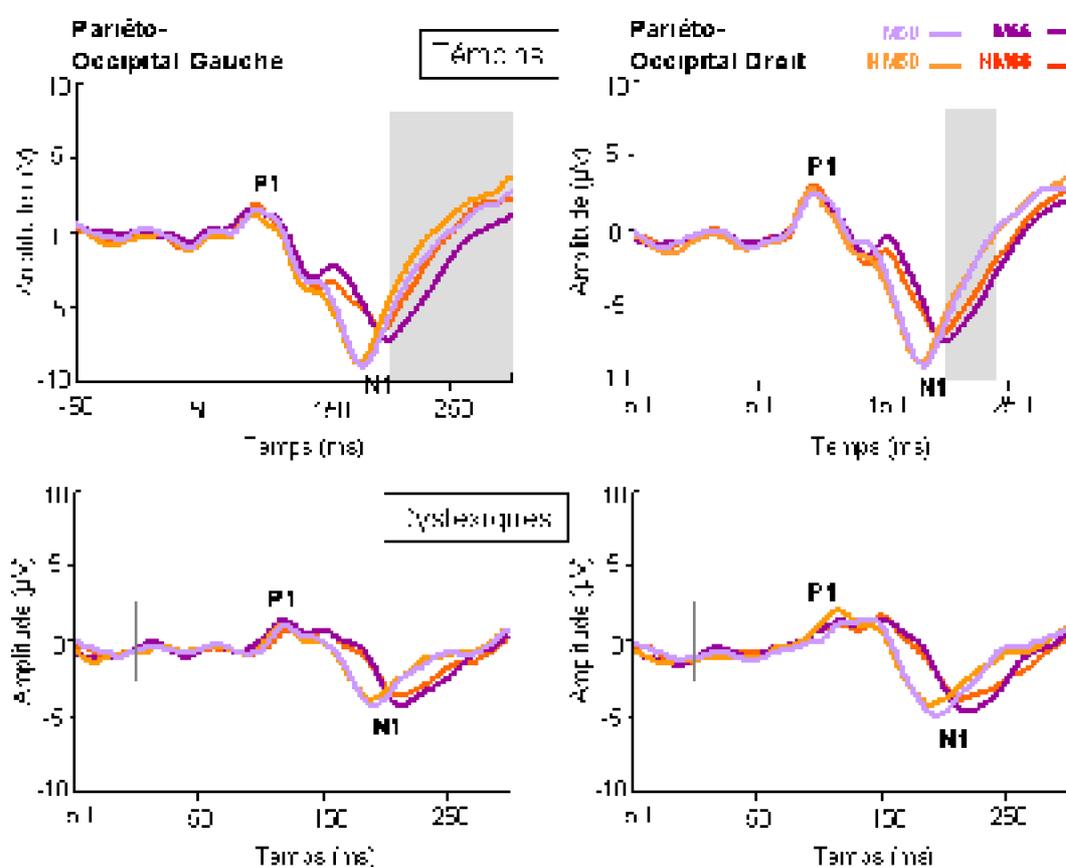


Figure 6.3 : PE mesurés dans les régions pariéto-occipitales gauche et droite (dérivations linéaires des électrodes O1, P5, PO3, PO7 et O2, P6, PO4, PO8), pour les deux contextes lexicaux Mot et Non-mot et les deux TP. Résultats comparatifs des sujets témoins (**Haut**) et dyslexiques (**Bas**). Les barres grises indiquent les intervalles de significativité du test t entre les contextes Mot et Non-mot, sur les dérivations linéaires droite et gauche.

Evènement N1

Les latences du pic N1 sont reportées dans le tableau ci-dessous :

	sujets Témoins	sujets Dyslexiques
<i>TP 50 ms</i>	184 ±15 ms	196 ±19 ms
<i>TP 66 ms</i>	210 ±19 ms	223 ±17 ms

Les différents résultats des analyses de variance réalisées sur latence et amplitude moyenne de la N1 sont présentés dans le tableau suivant :

N1	Latence	Amplitude moyenne
<i>effet de groupe</i>	F[1,18] = 4.22; p = .055	F[1,18] = 5.21; p = .03
<i>effet de lexicalité</i>	F[1,18] = .10; p = .75	F[1,18] = 4.26; p = .05
<i>effet de TP</i>	F[1,18] = 36.5; p = <10 ⁻⁴	F[1,18] = 17.22; p = .0006
<i>Interaction groupe/lexicalité/TP</i>	-	F[1,18] = 6.34; p = .02

La **latence** de la N1 n'est influencée ni par l'effet de groupe, ni par la lexicalité des stimuli. Cet évènement est significativement retardé et réduit pour 66 ms de TP par rapport à 50 ms de TP (Figure 6.3).

Des résultats de test *t* en séries appariées viennent compléter les résultats sur l'effet de TP : dans le tableau suivant sont indiqués les intervalles de temps dans lesquels les conditions de TP à 50 et 66 ms (toutes lexicalités confondues) diffèrent significativement.

Test <i>t</i>	sujets Témoins	sujets Dyslexiques
<i>région Pariéto-occipitale Gauche</i>	[156 – 190] et [202 – 278] ms	[164 – 198] et [208 – 256] ms
<i>région Pariéto-occipitale Droite</i>	[148 – 190] et [204 – 286] ms	[158 – 200] et [218 – 266] ms

L'**amplitude moyenne** de la N1 est dépendante de l'effet groupe, indépendante de la lexicalité, avec une triple interaction significative groupe/lexicalité/TP. L'analyse post-hoc (*test de Scheffé*) de cette triple interaction est résumée dans le tableau suivant. Les effets de lexicalité sont reportés, pour chaque TP et chaque groupe de sujets :

Test de Scheffé (effets de lexicalité)	sujets Témoins	sujets Dyslexiques
<i>TP 50 ms</i>	p = 1.0	p = .93
<i>TP 66 ms</i>	p = .02	p = .35

Ainsi, toutes conditions confondues, la N1 est moins ample chez les sujets dyslexiques que chez les témoins. Par ailleurs, la N1 est plus ample en contexte 'Mot' que 'Non-mot', uniquement chez les témoins, et uniquement à 66 ms. Aucun effet de lexicalité n'est obtenu, chez les sujets dyslexiques, sur l'amplitude moyenne de la N1.

Evènement N_{Left}

Dans la fenêtre temporelle [240 – 300] ms, les PE induits par l'identification de lettre sont dépendants des facteurs de lexicalité et de TP, avec une interaction significative entre groupe, lexicalité et hémisphère. Le détail des analyses est présenté dans le tableau suivant (voir les régions indiquées par des flèches vertes sur la figure 6.2)⁴⁹ :

N _{Left}	Amplitude moyenne
<i>effet de groupe</i>	F[1,18] = .66; p = .43
<i>effet de lexicalité</i>	F[1,18] = 5.26; p = .03
<i>effet de TP</i>	F[1,18] = 40.06; p < 10 ⁻⁵
<i>effet d'hémisphère</i>	F[1,18] = 4.16; p = .06
<i>Interaction lexicalité/groupe</i>	F[1,18] = 8.47; p = .009
<i>Interaction lexicalité/hémisphère</i>	F[1,18] = 18.33; p = .0005
<i>Interaction groupe/lexicalité/hémisphère</i>	F[1,18] = 7.55; p = .01

L'analyse post-hoc (*test de Scheffé*) de la triple interaction groupe/lexicalité/hémisphère est résumée dans le tableau suivant. Les effets de lexicalité sont reportés, pour chaque hémisphère et chaque groupe de sujets. Puis les effets hémisphériques sont présentés, pour chaque contexte lexical et chaque groupe de sujets :

Test de Scheffé (effets de lexicalité)	sujets Témoins	sujets Dyslexiques
<i>Hémisphère Gauche</i>	p = .00007	p = 1.0
<i>Hémisphère Droit</i>	p = .99	p = .97
Test de Scheffé (effets hémisphériques)	sujets Témoins	sujets Dyslexiques
<i>contexte 'Mots'</i>	p = .00003	p = .80
<i>contexte 'Non-mots'</i>	p = .93	p = 1.0

Chez les sujets témoins, on observe une négativité gauche – dans la région temporelle, entre 240 et 300 ms – dans le contexte 'Mot'. Cette négativité spécifique au contexte 'Mot' et à l'hémisphère gauche induit un effet significatif d'hémisphère dans le contexte 'Mot' et un effet de lexicalité significatif dans l'hémisphère gauche. Aucun de ces deux effets n'est observé dans le groupe de sujets dyslexiques.

Evènement P300

La P300 est maximale dans la région fronto-centrale, aux latences indiquées dans le tableau suivant :

⁴⁹ Pour cet évènement (N_{Left}), les latences ne sont pas analysées par ANOVA, puisqu'il ne s'agit pas d'un pic bien défini, mais d'une déviation négative.

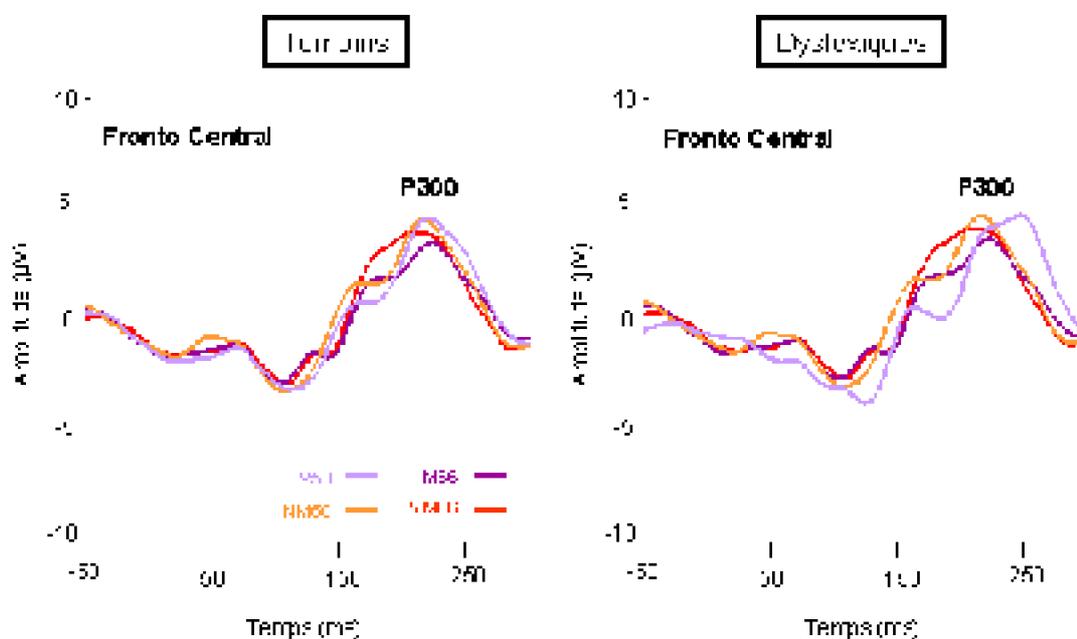
	SUJETS TEMOINS		SUJETS DYSLEXIQUES	
	TP 50 ms	TP 66 ms	TP 50 ms	TP 66 ms
Latence de P300				
contexte 'Mot'	229 ±19 ms	217 ±29 ms	239 ±14 ms	236 ±16 ms
contexte 'Non-mot'	217 ±25 ms	211 ±23 ms	234 ±16 ms	234 ±16 ms

La latence de la P300 est affectée par la lexicalité et le TP, alors que son amplitude moyenne n'est dépendante que du TP, ces effets étant identiques chez témoins et dyslexiques puisque aucun effet de groupe ni aucune interaction ne sont significatifs (figure 6.4)⁵⁰. Ces résultats sont résumés dans le tableau suivant :

P300	Latence	Amplitude moyenne
effet de groupe	F[1,18] = 3.71; p = .07	F[1,18] = .03; p = .86
effet de lexicalité	F[1,18] = 11.57; p = .003	F[1,18] = .01; p = .92
effet de TP	F[1,18] = 7.10; p = .02	F[1,18] = 9.66; p = .006

La P300 est plus précoce dans le contexte 'Non-mot' par rapport au contexte 'Mot'. Elle est moins ample et plus précoce à 66 ms de TP qu'à 50 ms. Ces observations sont identiques pour les deux groupes de sujets (voir figure 6.4).

Figure 6.4 : PE mesurés dans la région fronto-centrale (dérivation linéaire des électrodes F1, FC1, Fz, FCz, F2, FC2), pour les deux contextes lexicaux Mot et Non-mot et les deux TP. Comparaison des deux groupes de sujets : témoins (**Gauche**) et dyslexiques (**Droite**).



⁵⁰ Les effets d'hémisphère ne sont pas testés pour l'évènement P300, puisque ce pic est maximal en position centrale.

B.3.c. Discussion

Données comportementales

Un temps de présentation des items plus long entraîne une diminution significative des taux d'erreurs pour les deux groupes de sujets. Ainsi, la facilitation de la tâche entraînée par une meilleure vision des stimuli profite autant aux sujets dyslexiques qu'aux sujets témoins.

En revanche, le contexte lexical favorise l'identification de lettres pour les sujets témoins – effet classique de supériorité du mot – mais pas pour les sujets dyslexiques. Les dyslexiques, au vu des données comportementales, semblent souffrir d'une déficience d'effets "Top-down" lexicaux facilitateurs sur l'identification des lettres d'un mot connu. Comme nous l'avons mentionné dans nos hypothèses, aucune étude n'a été publiée, à notre connaissance, sur le "Word Superiority Effect" chez des sujets dyslexiques adultes. Deux études ont néanmoins révélé que ce WSE n'existait pas chez des enfants dyslexiques, qu'il soit ou non observé dans le groupe d'enfants témoins appariés en âge de lecture (Chase and Tallal, 1990; Grainger et al., 2003). L'apparition du WSE avec l'augmentation de l'âge de lecture, et donc l'augmentation du nombre de mots stockés dans le lexique mental (Mayall, 2002) semble donc ne pas avoir lieu chez les patients dyslexiques.

Evènement électrophysiologique précoce (P1)

Nous avons proposé dans l'analyse de cette étude chez les sujets normo-lecteurs que la P1 reflète le traitement des traits visuels des séquences de lettres. Cet évènement était indépendant, chez ces sujets, de la lexicalité et du temps de présentation (voir chapitre 4). Les résultats de l'étude chez des sujets dyslexiques révèlent que ces derniers ne semblent pas souffrir de déficit de traitement à ce stade "bas niveau" (Helenius et al., 1999b) : la P1 est indépendante des deux facteurs étudiés, de la même manière que pour les sujets contrôles.

Nous pouvons tout de même noter que la P1 semble moins ample et retardée chez les sujets dyslexiques par rapport aux témoins (voir figure 6.3), bien que ces effets ne soient pas statistiquement significatifs. Une diminution d'amplitude de la P1 chez des sujets dyslexiques a précédemment été montrée par Neville et al. (Neville et al., 1993).

Evènement N1 et effets "Top-down" lexicaux

Nous avons proposé, dans l'analyse précédente de cette étude, que la N1 reflète le stade de traitement des lettres d'une séquence de caractères linguistiques. D'après les résultats obtenus sur les sujets témoins, ce traitement est dépendant du contexte lexical (à 66 ms de TP). La présente étude révèle que ces effets de contexte lexical ne sont pas observés chez des sujets souffrant de dyslexie développementale. Cette nouvelle observation est congruente avec les résultats comportementaux : les sujets dyslexiques semblent souffrir d'un déficit d'effet "Top-down" lexical facilitateur au niveau du traitement des lettres d'une séquence.

Deux autres observations peuvent être faites sur l'évènement N1 :

(1) Outre le déficit d'effet "Top-down" lexical décrit précédemment, les sujets dyslexiques semblent souffrir d'un déficit général au niveau du stade de traitement des lettres, puisque la N1 est significativement moins ample, toutes conditions confondues, chez les sujets dyslexiques par rapport aux témoins (voir figure 6.3). De plus, même si la différence n'est pas significative, les latences de N1 sont plus élevées chez les sujets dyslexiques (moyenne de 210 ms) que chez les témoins (moyenne de 197 ms). Cette observation est à mettre en parallèle avec les données de Taylor & Keenan (Taylor and Keenan, 1990) ou de Ciesielski (Ciesielski, 1989), qui ont montré un allongement des latences de N1 chez des sujets dyslexiques comparés à des sujets témoins.

Par ailleurs, différents auteurs observent une absence ou une réduction d'activation temporo-occipitale chez les sujets dyslexiques dans des tâches de lecture de mots ou de pseudo-mots (Brunswick et al., 1999; Horwitz et al., 1998; Paulesu et al., 2001; Rumsey et al., 1997b; Salmelin et al., 1996). Salmelin et al. (Salmelin et al., 1996) interprètent ce déficit d'activation comme une incapacité à traiter la forme globale des mots à un niveau pré-lexical. Notre observation d'une diminution d'amplitude de la N1 chez les sujets dyslexiques est en parfait accord avec ces résultats, et renforce notre hypothèse selon laquelle la N1 refléterait le traitement pré-lexical des séquences de lettres.

(2) Bien que les sujets dyslexiques se différencient des témoins en terme de latence et d'amplitude de la N1, la dépendance de cette onde aux effets de TP est identique chez témoins et dyslexiques : la N1 est retardée et moins ample si le TP des stimuli augmente, pour les deux groupes de sujets.

Ainsi, le stade de traitement des lettres semble être déficitaire chez les sujets dyslexiques. On y observe un déficit d'effets "Top-down" lexicaux, alors que les influences de type "Bottom-up" (Temps de présentation des stimuli) sont identiques à celles des sujets témoins.

Evènement N_{Left} et traitement lexical

Entre 240 et 300 ms, une onde négative est observée dans la région temporale gauche, uniquement en contexte 'Mot', chez les sujets témoins. Cette onde pourrait refléter le stade de traitement des mots (Cohen et al., 2000; Pammer et al., 2004) (voir la discussion sur la N_{Left}, chapitre 4 ; paragraphe C.2.b). Cette différence hémisphérique n'est pas retrouvée chez les sujets dyslexiques, qui souffrent donc probablement d'un déficit de traitement de la forme globale des mots. Ce résultat est en accord avec les données de la littérature proposant que la dyslexie corresponde à un déficit ou un retard d'activation dans le "Visual Word Form System" (Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002; Nobre et al., 1994; Salmelin et al., 1996; Simos et al., 2002; Warrington and Shallice, 1980)

Evènement P300 et temps de catégorisation des stimuli

Dans cette étude, témoins et dyslexiques ne diffèrent pas au niveau de l'onde P300 : si la latence de la P300 reflète le temps de catégorisation du stimulus traité (Kutas et al., 1977; McCarthy and Donchin, 1981; Polich, 1986), témoins et dyslexiques catégorisent plus

rapidement les non-mots que les mots. Ceci peut sembler contradictoire avec le fait que les sujets dyslexiques ont un déficit de traitement de la forme des mots. Pourtant, nous pouvons expliquer ce phénomène par le fait que les mots et les non-mots, dans notre étude, ont des différences de 'formes' très importantes : les non-mots sont des successions de consonnes, aisément catégorisées comme n'étant pas des mots, même si le traitement des mots est déficitaire. La même expérience réalisée avec des mots et des pseudo-mots (séquences de lettres prononçables, proches visuellement de 'vrais' mots, mais sans signification dans la langue française) aurait sans doute provoqué des différences de temps de catégorisation entre les deux groupes de sujets. Nous pouvons donc déduire de cette étude que les sujets dyslexiques ne diffèrent pas des sujets témoins pour identifier un non-mot comme une chaîne de caractères non lexicale, même s'ils souffrent d'un déficit de traitement de la forme globale des mots.

De même que pour les autres composantes électrophysiologiques, les effets "Bottom-up" de temps de présentation n'induisent pas d'effet de groupe sur la P300 : sujets témoins et dyslexiques catégorisent plus rapidement les stimuli, quel que soit le contexte lexical, s'ils ont été présentés plus longtemps. Il semble ainsi que les sujets dyslexiques souffrent plus de déficits dans les processus "Top-down" que "Bottom-up".

Les sujets témoins et dyslexiques ne diffèrent pas, dans cette étude, pour ce qui est de la quantité de ressources attentionnelles allouées à la tâche. Cette variable est reflétée par l'amplitude de la P300 (Kramer and Strayer, 1988; Wickens et al., 1983), qui ne diverge pas entre sujets témoins et dyslexiques. Les effets de type "Bottom-up" induits par l'augmentation du temps de présentation diminuent la charge attentionnelle pour les deux groupes de sujets.

Cette diminution d'amplitude de la P300 avec augmentation du TP n'était pas significative dans l'étude réalisée chez les sujets normo-lecteurs (chapitre 4), mais une tendance était observée sur les tracés (voir figure 6.4, tracé des sujets témoins). Ainsi, nous pouvons ajouter à l'étude précédente que la charge attentionnelle est dépendante des effets "Bottom-up" de temps de présentation, ces effets étant faibles et nécessitant une population de sujets suffisamment importante pour être significatifs.

Aucun déficit de temps de catégorisation ou de charge attentionnelle n'est donc observé chez les sujets dyslexiques ayant réalisé cette étude. Or, différentes études ont rapporté que la P300 est réduite ou retardée chez les sujets dyslexiques (Holcomb et al., 1986; Lovrich and Stamm, 1983; Taylor and Keenan, 1990), que ces anomalies de P300 soient dues à la dyslexie en temps que telle, ou à ses troubles attentionnels associés (Taylor, 1995).

Cette absence de troubles attentionnels chez les sujets dyslexiques testés peut être due au fait que la tâche proposée dans cette étude ne nécessite qu'une charge attentionnelle relativement faible, ce qui ne permettrait pas de différencier témoins et dyslexiques sur ce processus cognitif particulier. Nous affinerons cette discussion à la suite de la présentation de la tâche attentionnelle (voir chapitre 5 pour les résultats des sujets normo-lecteurs) que nous avons proposée à la même population de sujets dyslexiques, et dont les résultats seront décrits à la suite de ce chapitre.

Nous pouvons résumer les principaux résultats obtenus grâce à l'étude comparative

des sujets normo-lecteurs et dyslexiques (voir le schéma présenté figure 6.5) :

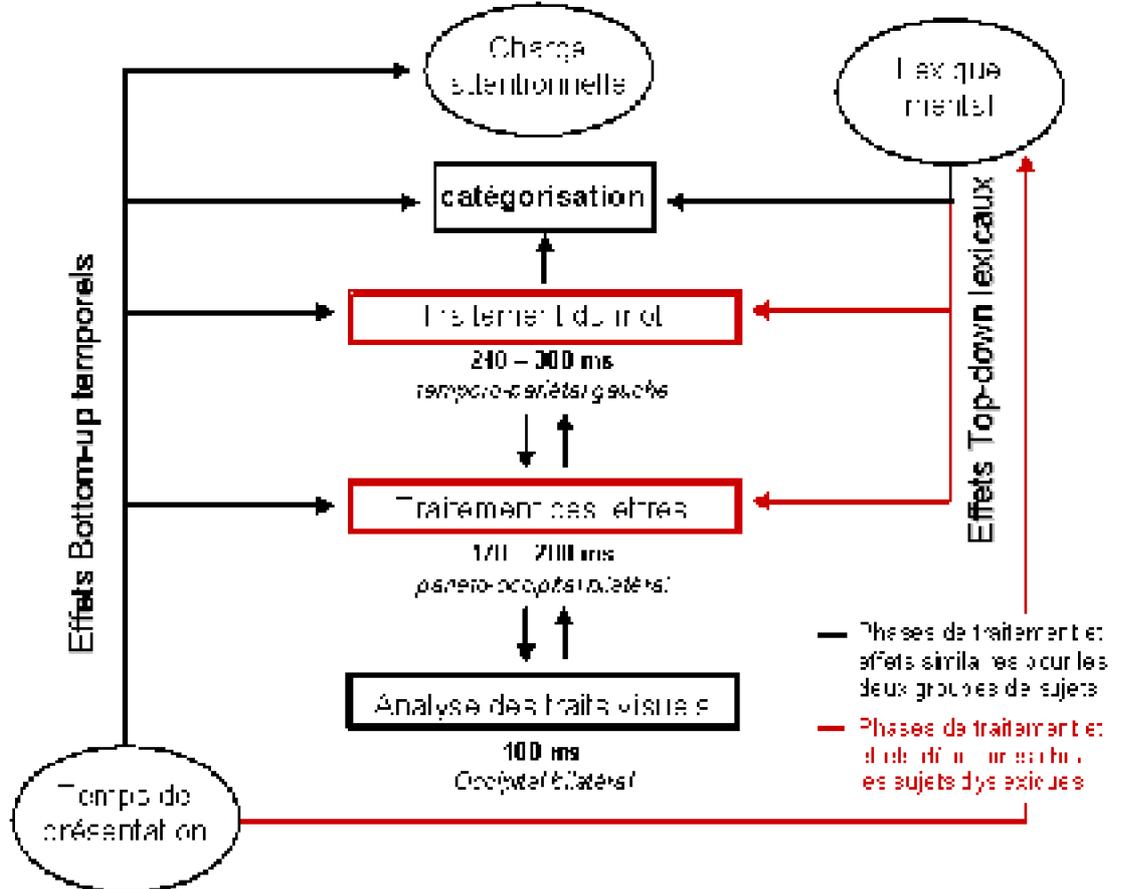


Figure 6.5 : Schéma de synthèse des effets "Bottom-up" et "Top-down" influençant l'identification de lettres (toutes positions de regard confondues) chez des sujets adultes normo-lecteurs ou dyslexiques.

B.4. Etude des effets "Top-down" lexicaux en fonction de la position du regard

Pour cette étude comparative sur l'identification de lettre en fonction des différentes positions de regard, nous analyserons dans un premier temps les données comportementales des sujets témoins et dyslexiques. Nous n'étudierons pas les effets lexicaux influençant différenciellement l'amplitude de la N1 en fonction de la position de regard, puisque nous venons de montrer dans le paragraphe précédent que ces effets lexicaux ne sont pas mis en évidence dans le groupe de sujets dyslexiques. Par contre,

nous étudierons les effets de position de regard sur la P1 et le transfert hémisphérique, comme ceci a déjà été fait dans l'étude sur les sujets normo-lecteurs (chapitre 4).

B.4.a. Résultats comportementaux

Les résultats comportementaux sur l'identification de lettre en fonction de sa position dans la séquence sont présentés dans la figure 6.6, et les analyses statistiques sont résumées dans le tableau ci-dessous.

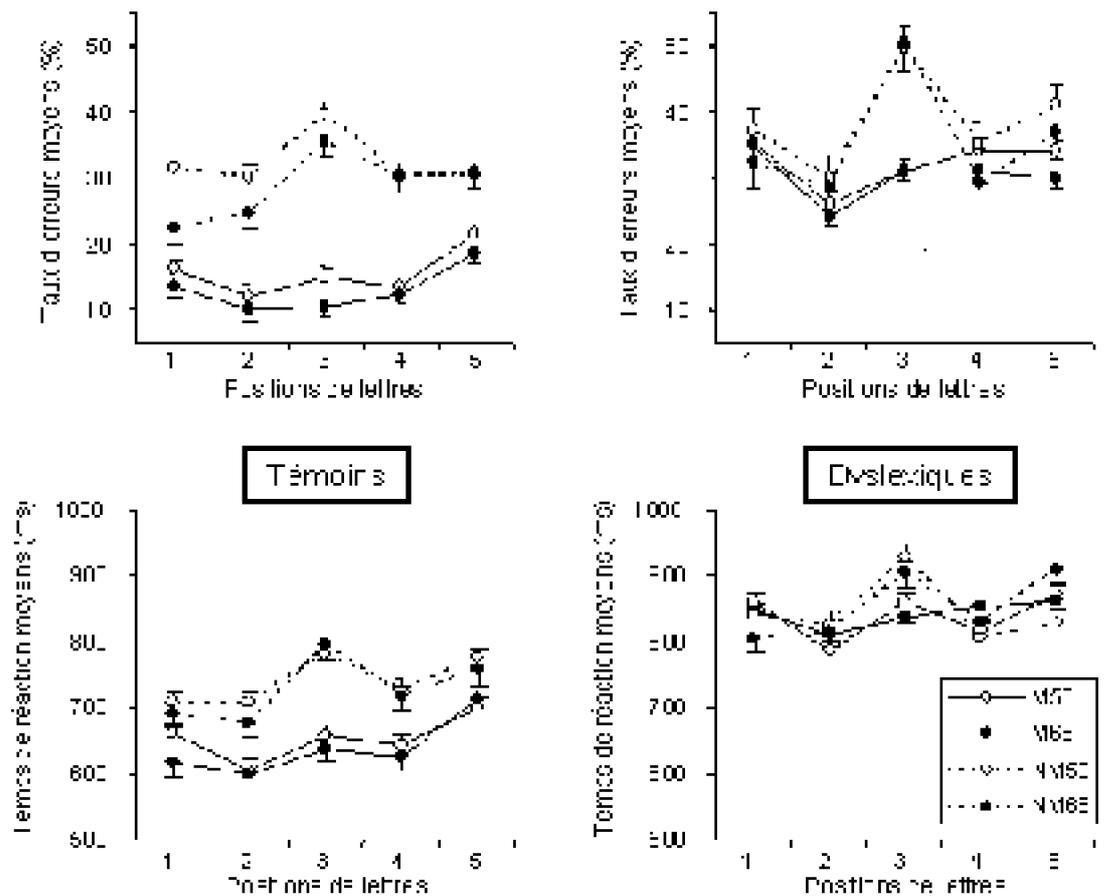


Figure 6.6 : Résultats comportementaux en fonction des 5 positions de lettres. **Haut.** Taux d'erreurs moyens des sujets en fonction des positions de lettres, pour les 4 conditions principales de la tâche. **Bas.** Temps de réaction moyens en fonction des positions de lettres. Les résultats des sujets témoins (**Gauche**) sont comparés à ceux des sujets dyslexiques (**Droite**).

	Taux d'erreurs	Temps de réaction
<i>effet de groupe</i>	F[1,18] = 3.54; p = .08	F[1,18] = 3.71; p = .07
<i>effet de lexicalité</i>	F[1,18] = 14.90; p = .001	F[1,18] = 4.0; p = .06
<i>effet de TP</i>	F[1,18] = 18.20; p = .0005	F[1,18] = 1.50; p = .24
<i>effet de position</i>	F[2.82,50.75] = 9.14; p < 10 ⁻⁴	F[2.87,51.59] = 8.87; p < 10 ⁻⁴
<i>Interaction groupe/lexicalité</i>	F[1,18] = 5.25; p = .03	F[1,18] = 3.52; p = .08
<i>Interaction position/lexicalité</i>	F[3.05,54.93] = 9.96; p < 10 ⁻⁴	F[2.69,48.42] = 2.79; p = .06
<i>Interaction groupe/position</i>	F[2.82,50.75] = 1.02; p = .39	F[2.87,51.59] = .89; p = .45

Dans cette analyse, on retrouve les effets significatifs de lexicalité sur les taux d'erreurs pour le groupe de sujets témoins, pas pour les sujets dyslexiques : l'analyse post-hoc de l'interaction groupe/lexicalité montre un effet lexical significatif chez les témoins ($p = .004$), pas chez les dyslexiques ($p = .75$). Les effets de TP sur les taux d'erreurs sont retrouvés, comme dans l'analyse précédente, pour les deux groupes de sujets (voir paragraphe B.3.a de ce chapitre).

Dans cette nouvelle analyse des résultats comportementaux, on observe un effet de la position de la lettre dans la séquence ainsi qu'une interaction significative entre position et lexicalité. Ainsi, les effets de lexicalité – chez les sujets témoins – ne sont pas identiques d'une position à une autre (voir chapitre 4 ; paragraphe D.1.a). Par ailleurs, l'effet de position n'est pas couplé à une interaction groupe/position. Ainsi, bien que les sujets dyslexiques ne révèlent aucun effet de lexicalité, leurs taux d'erreurs sont tout de même influencés par les différentes positions de lettres.

Le seul effet significatif sur les TR est celui de la position de lettre. Cet effet est similaire pour les deux groupes de sujets puisque l'interaction groupe/position n'est pas significative.

B.4.b. Etude du transfert interhémisphérique

Comme dans l'étude précédente sur les sujets normo-lecteurs, nous avons recensé les valeurs individuelles de latences de P1, pour les positions de lettres 1 et 5, dans les deux hémisphères (voir chapitre 4 ; paragraphe E.3). De même que pour les sujets témoins, l'onde P1 dans le groupe de sujets dyslexiques est indépendante du contexte lexical et du temps de présentation (voir les résultats du paragraphe B.3.b). Le temps de transfert interhémisphérique (IHTT) est donc estimé, comme pour les sujets témoins, à partir des données individuelles de latences de P1, tous contextes lexicaux et temps de présentation confondus.

L'analyse des latences de la P1 révèle un effet de groupe significatif ($F[1, 18] = 7.76$; $p = .01$), un effet significatif de la position de lettre ($F[1, 18] = 10.03$; $p = .005$), aucun effet d'hémisphère ($F[1, 18] = .46$; $p = .51$), et une forte interaction position/hémisphère ($F[1, 9] = 185.85$; $p < 10^{-6}$). L'interaction entre les deux facteurs est mise en évidence sur la figure 6.7.

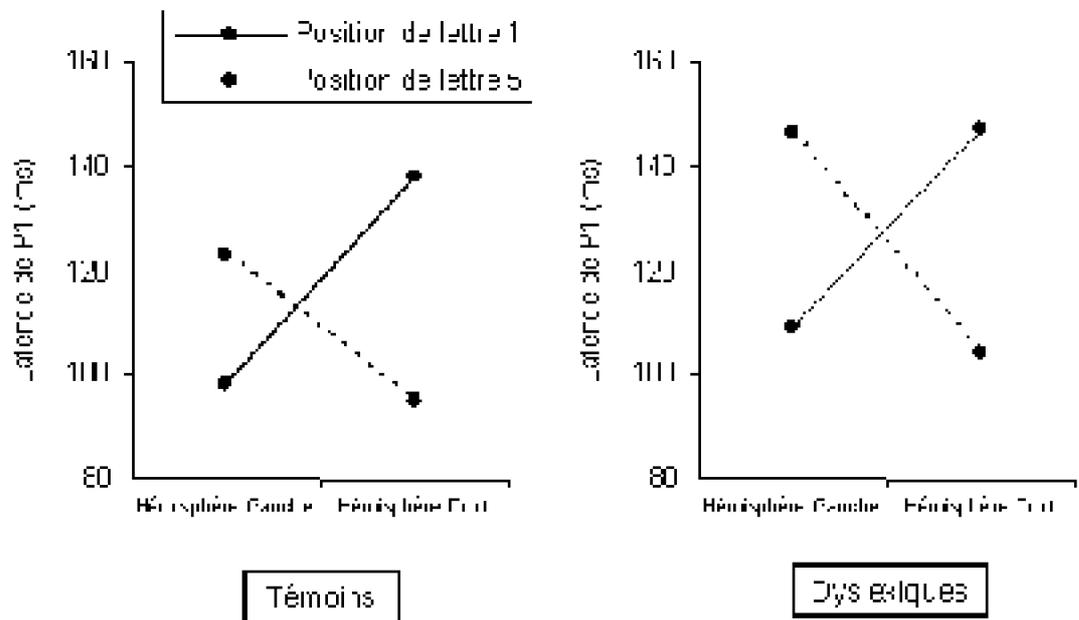


Figure 6.7 : Latences moyennes de P1 dans les deux hémisphères cérébraux, pour les positions de lettres 1 et 5. Le graphique illustre la forte interaction existant entre les deux facteurs de position et d'hémisphère, pour les sujets témoins (**Gauche**) et dyslexiques (**Droite**).

Chez les sujets dyslexiques, le transfert interhémisphérique de gauche à droite se fait en 37 ms en moyenne (40 ms pour les témoins); celui de droite à gauche en 42 ms en moyenne (28 ms pour les témoins)⁵¹.

La vitesse de transfert n'est pas significativement différente d'un sens à l'autre (valeur de p du test $t = .051$) chez les dyslexiques et il n'y a pas de différence significative entre les groupes (valeur de p du test $t = .28$).

B.4.c. Discussion

Données comportementales

Des effets significatifs de position de lettre sont observés sur les taux d'erreurs et les TR, pour les deux groupes de sujets. Ces effets sont donc similaires pour les deux populations. On remarque en effet (figure 6.6) que la troisième position de lettre est très défavorable dans les non-mots, induisant dans les deux groupes de sujets des taux d'erreurs et des TR plus élevés que les autres positions. Nous avons vu dans l'analyse réalisée sur les sujets témoins que le désavantage de la position centrale dans l'identification de lettres était du au masquage latéral (chapitre 4 ; paragraphe D.2.a).

⁵¹ Pour le détail sur les calculs de IHTT, voir le chapitre 4 ; paragraphe E.3

Cette étude comparative des sujets témoins et dyslexiques confirme cette thèse : le masquage latéral, qui est un phénomène purement visuel, influence l'identification de lettres de la même manière dans les deux populations (les sujets témoins et dyslexiques ayant tous été contrôlés comme ayant une vision normale ou corrigée à la normale).

Transfert interhémisphérique

La première observation faite des résultats sur le transfert interhémisphérique est que, toutes positions et hémisphères confondus, les latences de P1 sont significativement plus élevées pour les dyslexiques que pour les témoins. Ceci confirme une tendance – bien que non significative – observée lors de l'étude des latences de P1 toutes positions de regard confondues (voir les résultats du paragraphe B.3.b, discutés au paragraphe B.3.c). Mise à part cette différence générale de latence, les mêmes effets de position et d'interaction position/hémisphère sont observés chez les sujets dyslexiques et chez les sujets témoins (voir figure 6.7). Les sujets dyslexiques semblent donc avoir un IHTT identique à celui des sujets témoins.

En étudiant plus précisément le temps de transfert interhémisphérique, on observe que celui-ci est similaire d'un groupe de sujets à l'autre, ce qui est congruent avec les résultats de la littérature (Davidson et al., 1990). Par contre, l'avantage du transfert de l'hémisphère droit à l'hémisphère gauche observé chez les sujets témoins (tendance non significative) n'est pas retrouvé chez les sujets dyslexiques. Nous pouvons supposer que le transfert plus rapide des informations visuelles vers l'hémisphère gauche est un avantage sélectif à transférer les informations visuelles langagières vers l'hémisphère principalement en charge du traitement de ce type d'informations. Si tel est le cas, nous émettons l'hypothèse que les patients dyslexiques ne bénéficient pas de cet avantage.

Nous avons vu dans l'introduction générale (chapitre 1 ; paragraphe C.5.f) que les dyslexiques souffrent d'une latéralisation hémisphérique atypique (Orton, 1925) : chez les patients dyslexiques, l'hémisphère droit participerait de façon anormalement importante au langage, en raison d'un défaut de spécialisation des aires du langage à gauche (Bakker et al., 1990). Si l'on tient compte de cette théorie, le fait que le temps de transfert accéléré de l'hémisphère droit à l'hémisphère gauche soit déficitaire chez les dyslexiques peut s'expliquer par le fait que le transfert rapide d'information linguistique visuelle vers l'hémisphère gauche n'est pas avantageux pour ces patients.

B.5. Conclusion

Les sujets dyslexiques de notre étude sont déficitaires pour les processus de 'haut niveau', aux stades de traitement des lettres et des séquences de lettres. Par contre, ils ne montrent aucune déficience au niveau de traitement 'bas niveau' des traits visuels. De plus, ces patients souffrent d'un déficit dans les effets "Top-down" lexicaux facilitateurs, alors qu'ils sont semblables aux témoins pour ce qui est des influences de type "Bottom-up" (effets du temps de présentation des stimuli et de la position de regard). Dans le cas particulier de cette tâche, ils ne divergent pas des témoins d'un point de vue attentionnel.

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

De plus la pathologie dyslexique ne semble pas influencer le temps de transfert interhémisphérique, de l'ordre de 30 à 40 ms pour les sujets dyslexiques et contrôles. Pourtant, le temps de transfert plus court dans le sens hémisphère droit vers hémisphère gauche observé chez les sujets témoins n'est pas retrouvé chez les sujets dyslexiques.

Les principaux résultats de cette étude sur l'identification de lettres chez des adultes dyslexiques sont présentés dans le schéma de synthèse de la figure 6.8.

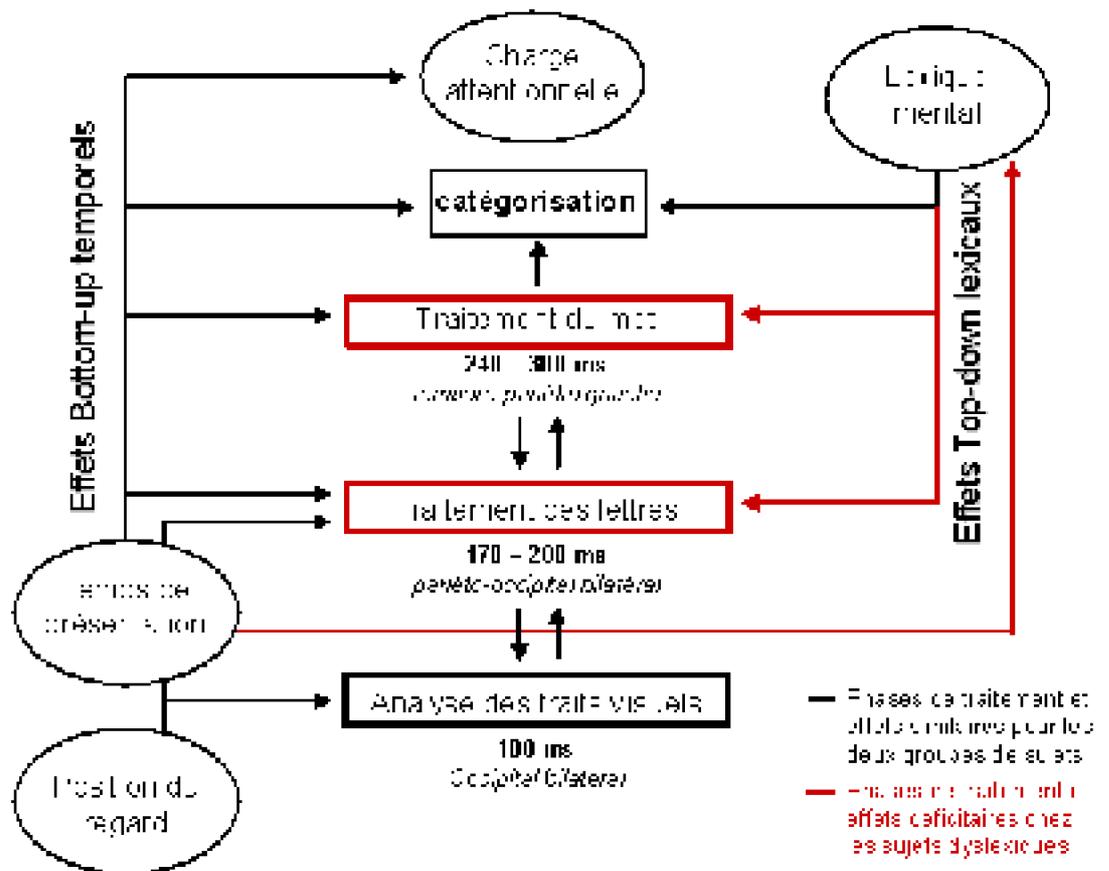


Figure 6.8 : Schéma de synthèse des effets "Bottom-up" et "Top-down" influençant l'identification de lettres, chez des sujets adultes normo-lecteurs ou dyslexiques.

Après avoir décrit les déficits d'origine lexicale mis en évidence chez les sujets dyslexiques, nous allons maintenant étudier leurs éventuels déficits attentionnels, à l'aide d'une tâche spécifiquement dédiée à l'analyse de ces processus.

C. Dyslexie et effets "Top-down" attentionnels

C.1. Introduction

L'expérience basée sur le paradigme 'Hold/Release' – présentée au chapitre 5 – nous a permis de définir différents effets "Top-down" attentionnels au cours d'une tâche de décision lexicale sur des paires de stimuli. L'incidence de ces effets attentionnels a été étudiée, chez des sujets normo-lecteurs, au niveau de trois événements électrophysiologiques majeurs : les ondes P1, N1 et P300.

La même tâche a été proposée à un groupe de sujets dyslexiques. Les résultats électrophysiologiques obtenus sont extrêmement bruités (voir figure 6.10), et les événements P1 et N1 sont difficilement identifiables au niveau des tracés de potentiels individuels. Nous expliquons cette observation préliminaire par :

(1) le fait que la population de sujets dyslexiques recrutés pour cette expérience ne comprend que 8 sujets, alors que la population contrôle comprend 16 sujets.

(2) Par ailleurs, la tâche est très complexe et stressante pour les dyslexiques. La majorité des sujets dyslexiques confiaient lors du débriefing que la tâche leur avait posé beaucoup de difficultés, puisqu'elle nécessite une attention très soutenue, et la réalisation successive et rapide de deux décisions lexicales – tâche beaucoup plus coûteuse pour les sujets souffrant de dyslexie développementale que pour les sujets normo-lecteurs.

(3) Du fait de cette complexité de la tâche, les sujets dyslexiques commettent de nombreuses erreurs. Puisque nous retirons les portions de tracés correspondant aux mauvaises réponses des sujets, les tracés que nous obtenons sont réalisés sur la moyenne de peu d'essais, ce qui diminue le rapport signal/bruit.

(4) De plus, la dyslexie est un trouble de la lecture ayant une symptomatologie très variée, et les populations de dyslexiques regroupent donc des individus très différents d'un point de vue des capacités cognitives. L'hétérogénéité de la population peut aussi expliquer le fait que les résultats électrophysiologiques ne soient pas aussi 'nets' que pour la population témoin.

Quelle que soit la raison de cette observation, nous avons considéré que les ondes P1 et N1 n'étaient pas analysables pour le groupe de sujets dyslexiques. Nous allons donc restreindre l'étude comparative des deux populations à l'analyse de l'onde P300 et de la dérive négative de potentiel. Ces deux événements reflètent la charge attentionnelle et la charge en mémoire de travail, qui sont connues pour être déficitaires chez de nombreux sujets dyslexiques. Nous allons, grâce à notre paradigme particulier, pouvoir observer les différents effets "Top-down" attentionnels influant sur ces deux variables, chez des sujets dyslexiques.

L'analyse de la population de sujets normo-lecteurs nous a permis de mettre en évidence différents effets attentionnels ayant une incidence sur l'onde P300 et sur la

dérive négative de potentiel (observée entre la P300 sur le premier item et la présentation du second item d'une paire) :

(1) le temps de catégorisation d'un stimulus est indépendant de l'attention sélective du sujet portée sur une catégorie cible particulière. Par contre, il est fortement dépendant de la congruence du stimulus avec cette catégorie cible, quelle que soit la charge en mémoire de travail et l'amorçage lexical.

(2) La quantité de ressource attentionnelle allouée au traitement d'un stimulus est indépendante de l'attention sélective portée à une catégorie et de la congruence du stimulus avec cette catégorie, lorsque la tâche est 'facilitée' par un amorçage du traitement lexical en mémoire de travail. Si la tâche est plus complexe et non amorcée, la charge attentionnelle deviendra dépendante de ces deux facteurs : la P300 traduit alors une mobilisation attentionnelle maximale quand le sujet doit se placer dans une situation de maintien d'attention, de stockage d'information en mémoire de travail et d'accès implicite à la mémoire lexicale.

(3) La ressource attentionnelle allouée au traitement d'un stimulus et le temps de catégorisation de ce stimulus sont très fortement dépendants du soutien de l'attention du sujet.

(4) Enfin, l'onde P300 sur le premier item est suivie d'une dérive négative de potentiel. Cette dérive est plus importante en condition 'Hold' (maintien de l'attention) que 'Release' (relâchement de l'attention), ainsi qu'en condition 'cible Mot' plutôt que 'cible Pseudo-mot'. Elle reflète la charge en mémoire de travail.

En se basant sur les résultats obtenus dans cette étude par les sujets normo-lecteurs ainsi que sur les connaissances publiées antérieurement sur 'électrophysiologie et dyslexie' (voir chapitre 1 ; paragraphe E.7), nous avons pu émettre un certain nombre d'hypothèses quant aux résultats attendus chez des sujets dyslexiques réalisant la même tâche :

(1) bien qu'il soit difficile de prédire si les anomalies de P300 observées chez les sujets dyslexiques sont dues à la dyslexie en tant que telle ou à des troubles attentionnels associés (Taylor, 1995), il n'en demeure pas moins que l'onde P300 est réduite et/ou retardée chez les sujets dyslexiques (Holcomb et al., 1986; Lovrich and Stamm, 1983; Taylor and Keenan, 1990). En effet, les dyslexiques ayant fréquemment des troubles attentionnels associés (Demonet et al., 2004; Ramus, 2001; Valdois et al., 2004), ainsi que des déficits de catégorisation des stimuli langagiers (Fletcher and Prior, 1990; Miller-Shaul and Breznitz, 2004; Murphy et al., 1988), nous supposons que l'onde P300 observée dans notre population de sujets dyslexiques sera significativement moins ample et retardée par rapport aux sujets contrôles.

(2) Par ailleurs, la dyslexie comprend fréquemment parmi ses symptômes des déficits de capacité en mémoire de travail (Demonet et al., 2004; Jeffries and Everatt, 2004; Kibby et al., 2004; Ramus, 2001). Si la dérive négative de potentiel – observée dans la fenêtre temporelle [600 – 780] ms, chez les sujets témoins – est due au stockage d'information en mémoire de travail, nous faisons l'hypothèse que cette dérive négative sera absente ou moins ample chez les sujets dyslexiques.

C.2. Matériel et méthodes

C.2.a. Participants

Huit sujets de langue maternelle française ont passé cette expérience (6 hommes et 2 femmes, d'un âge moyen de 24.6 ans \pm 6.8, tous droitiers). Chaque sujet a donné préalablement son consentement éclairé pour participer à un protocole de recherche sans bénéfice individuel direct. Ce protocole avait été validé par un comité d'éthique local et assuré par l'INSERM. Tous les sujets avaient par ailleurs une vue normale ou corrigée à la normale.

C.2.b. Stimuli, tâche, acquisition et analyses

L'expérience réalisée sur le groupe de sujets adultes dyslexiques, selon le paradigme 'Hold/Release', est exactement la même que celle présentée dans le chapitre 5, pour des adultes normo-lecteurs (qui formeront le groupe contrôle). Le même paradigme a été utilisé, avec les mêmes stimulations et dans les mêmes conditions d'enregistrement. Ainsi, la section 'Matériel et méthodes' de ce chapitre ne sera pas développée, toute la description ayant été faite dans le paragraphe C. du chapitre 5.

C.3. Résultats

C.3.a. Résultats comportementaux

Les résultats comportementaux sont représentés sur la figure 6.9, les résultats statistiques étant reportés dans le tableau ci-dessous. Les facteurs analysés sont le groupe (Témoins *versus* Dyslexiques), la catégorie cible ('Mot' *versus* 'Pseudo-mot') et la condition d'attention ('Hold' ; réponse après présentation du second item *versus* 'Release' ; prise de décision et réponse du sujet après présentation du premier item).

	Taux d'erreurs	Temps de réaction
<i>effet de groupe</i>	$F[1,22] = 143.86; p < 10^{-6}$	$F[1,22] = 71.79; p < 10^{-6}$
<i>effet de catégorie cible</i>	$F[1,22] = 23.32; p < 10^{-4}$	$F[1,22] = .06; p = .81$
<i>effet de condition d'attention</i>	$F[1,22] = 26.31; p < 10^{-4}$	$F[1,22] = 333.46; p < 10^{-6}$
<i>Interaction groupe/cible</i>	$F[1,22] = 47.71; p < 10^{-5}$	$F[1,22] = 13.10; p = .002$
<i>Interaction groupe/attention</i>	$F[1,22] = 2.73; p = .11$	$F[1,22] = 60.08; p < 10^{-6}$
<i>Interaction cible/attention</i>	$F[1,22] = 1.57; p = .22$	$F[1,22] = .14; p = .71$

Pour les statistiques sur les taux d'erreurs, l'interaction groupe/cible est analysée grâce à un test post-hoc de Scheffé : l'effet cible est fortement significatif pour les sujets dyslexiques ($p < 10^{-5}$), il ne l'est pas pour les sujets témoins ($p = .38$).

Pour les TR, le même type d'analyse post-hoc est réalisé : (1) l'interaction groupe/cible s'explique par le fait que l'effet cible est significatif pour les sujets témoins (p

= .03) alors qu'il ne l'est pas pour les sujets dyslexiques ($p = .26$). (2) L'interaction groupe/attention vient du fait que les sujets témoins et dyslexiques diffèrent significativement au niveau de leurs TR en condition 'Release' ($p < 10^{-6}$), alors qu'ils ne diffèrent pas significativement en condition 'Hold' ($p = .57$).

Les sujets témoins répondent significativement mieux à la tâche que les sujets dyslexiques. Les taux d'erreurs sont significativement plus faibles pour la catégorie cible 'Pseudo-mot' que pour la catégorie cible 'Mot', uniquement pour les sujets dyslexiques. Ils sont aussi significativement plus faibles en condition 'Release' plutôt que 'Hold', pour les deux groupes de sujets.

Les temps de réaction (TR) sont significativement plus courts pour les sujets témoins plutôt que dyslexiques, surtout pour la condition 'Release'. Ils sont significativement plus courts en condition 'Hold' plutôt que 'Release' pour les deux groupes de sujets. Enfin, les TR sont plus faibles pour la catégorie cible 'Mots' plutôt que 'Pseudo-mots', uniquement pour les sujets témoins.

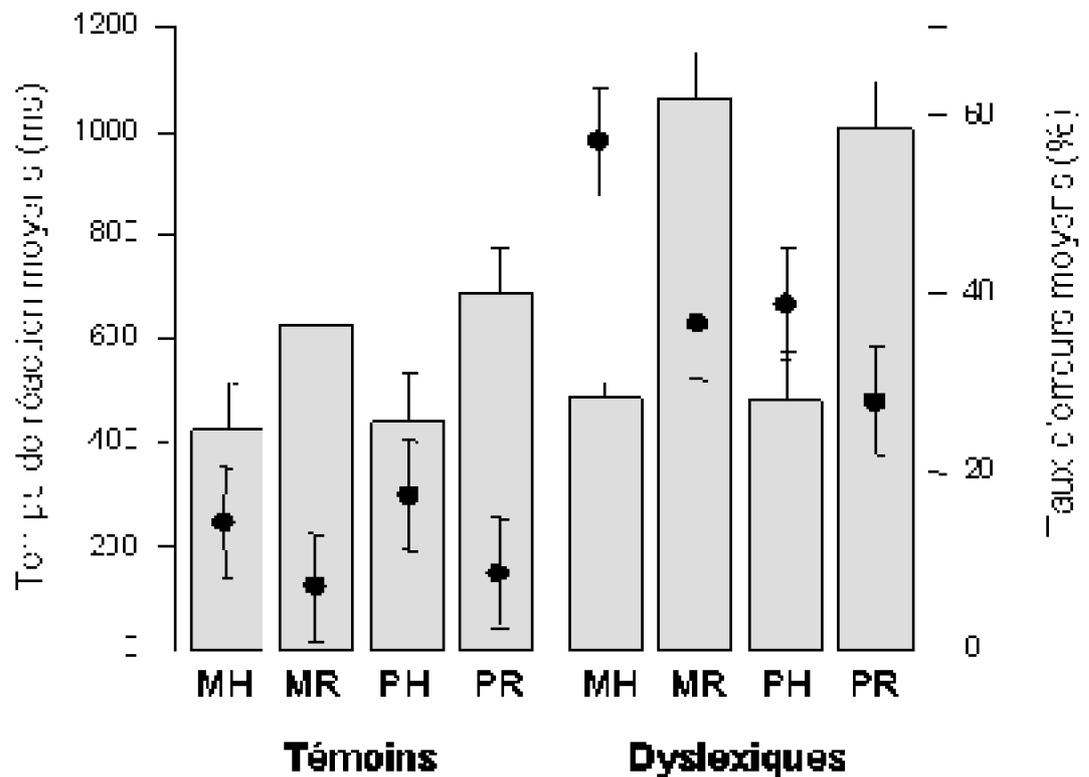


Figure 6.9 : Résultats comportementaux. MH correspond à la condition 'Mot/Hold' ; MR correspond à la condition 'Mot/Release' ; PH correspond à la condition 'Pseudo-mot/Hold' ; PR correspond à la condition 'Pseudo-mot/Release'. Les histogrammes représentent les temps de réaction moyens et les cercles indiquent les taux d'erreurs moyens. Les barres d'erreurs indiquent les erreurs standard. Les résultats des sujets témoins sont présentés à gauche de la figure, ceux des sujets dyslexiques à droite.

Comme pour les sujets contrôles, nous avons complété notre étude des résultats comportementaux en comparant les taux d'erreurs et les temps de réaction pour les

conditions Mmm, Mmp, Ppp et Ppm (quatre sous-conditions des conditions 'Mots/Hold' et 'Pseudo-mots/Hold'). Ces résultats complémentaires sont présentés figure 6.10, les résultats statistiques étant reportés dans le tableau ci-dessous. Les facteurs analysés sont le groupe ('Témoins' *versus* 'Dyslexiques'), la catégorie cible (correspondant à la catégorie du premier item de la paire ; 'Mot' *versus* 'Pseudo-mot') et la congruence du second item avec la catégorie cible ('Congruence' *versus* 'Incongruence').

Figure 6.10 : Résultats comportementaux. Mmm correspond à la condition 'cible Mot/Congruence du second item' ; Mmp correspond à la condition 'cible Mot/Incongruence du second item' ; Ppp correspond à la condition 'cible Pseudo-mot/Congruence du second item' ; Ppm correspond à la condition 'cible Pseudo-mot/Incongruence du second item'. Les histogrammes représentent les temps de réaction moyens et les cercles indiquent les taux d'erreurs moyens. Les barres d'erreurs indiquent les erreurs standard. Les temps de réaction sont comptés à partir de la latence de 720 ms (voir le paragraphe C.4. pour explication). Les résultats des sujets témoins sont présentés à gauche de la figure, ceux des sujets dyslexiques à droite.

	% d'erreurs	Temps de réaction
<i>effet de groupe</i>	$F[1,22] = 60.6; p < 10^{-6}$	$F[1,22] = 4.57; p = .04$
<i>effet de catégorie cible</i>	$F[1,22] = 20.37; p = .0002$	$F[1,22] = .04; p = .84$
<i>effet de congruence</i>	$F[1,22] = 33.41; p < 10^{-5}$	$F[1,22] = 238.36; p < 10^{-6}$
<i>interaction groupe/cible</i>	$F[1,22] = 3.01; p = .10$	$F[1,22] = 3.49; p = .08$
<i>interaction groupe/congruence</i>	$F[1,22] = 3.11; p = .09$	$F[1,22] = 5.7; p = .03$
<i>interaction cible/congruence</i>	$F[1,22] = 14.02; p = .001$	$F[1,22] = .17; p = .69$

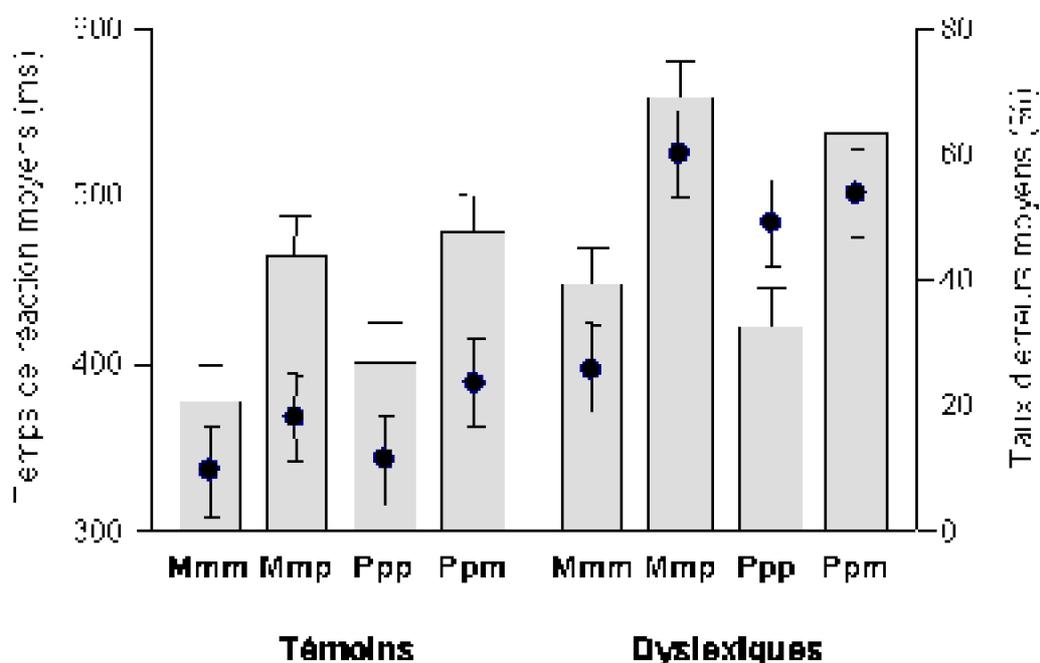


Figure 6.10 : Résultats comportementaux. Mmm correspond à la condition 'cible Mot/Congruence du second item' ; Mmp correspond à la condition 'cible Mot/Incongruence du second item' ; Ppp correspond à la condition 'cible Pseudo-mot/Congruence du second item' ; Ppm correspond à la condition 'cible Pseudo-mot/Incongruence du second item'.

*Les histogrammes représentent les temps de réaction moyens et les cercles indiquent les taux d'erreurs moyens. Les barres d'erreurs indiquent les erreurs standard. Les temps de réaction sont comptés à partir de la latence de 720 ms (voir le paragraphe C.4. pour explication). Les résultats des sujets témoins sont présentés à **gauche** de la figure, ceux des sujets dyslexiques à **droite**.*

Toutes conditions confondues, les sujets contrôles répondent significativement mieux que les sujets dyslexiques. Par ailleurs, les taux d'erreurs sont significativement plus faibles pour la catégorie cible 'Mot' que pour la catégorie cible 'Pseudo-mot', pour les deux groupes de sujets. Ils sont aussi significativement plus faibles en condition de 'Congruence' du second item avec la cible plutôt qu'en condition d'Incongruence', toujours pour les deux groupes de sujets.

Toutes conditions confondues, les sujets contrôles répondent significativement plus vite que les sujets dyslexiques. De plus, les temps de réaction sont significativement plus courts en condition de 'Congruence' du second item avec la cible plutôt qu'en condition d'Incongruence'.

C.3.b. Présentation générale des résultats de PE

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, les tracés de PE sont extrêmement bruités pour les sujets de la population dyslexiques. Ces tracés sont représentés sur la figure 6.11, superposés à ceux des sujets contrôles.

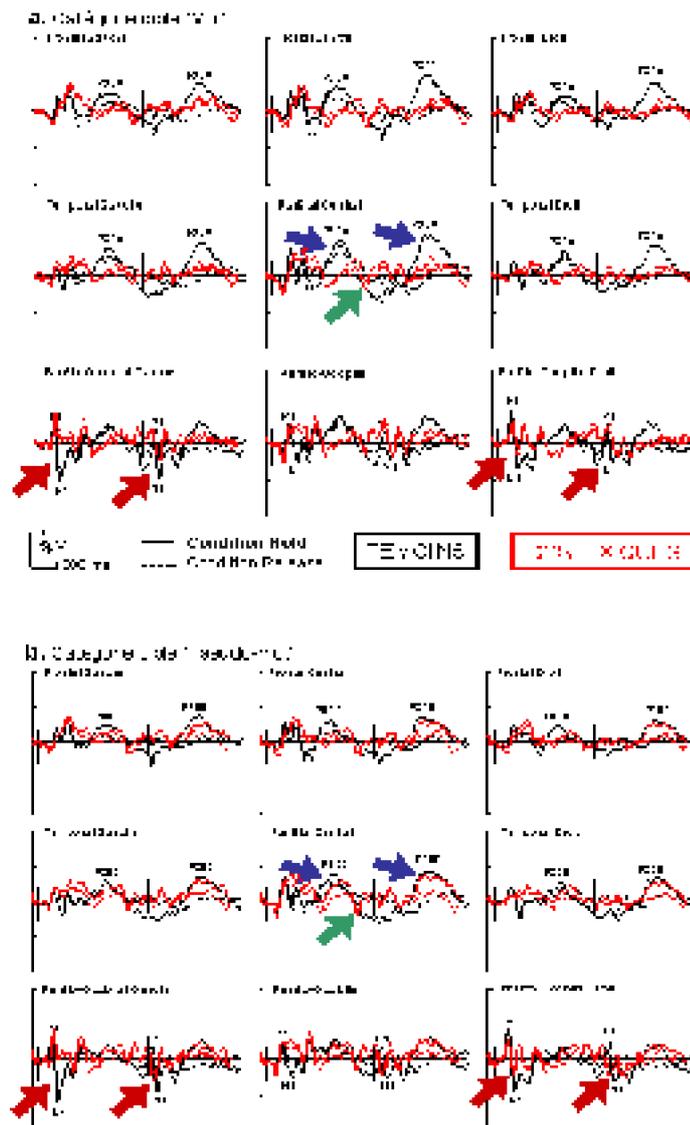


Figure 6.11 : Résultats de Potentiels Evoqués pour 9 régions principales du scalp (Frontal Gauche ; Frontal Central ; Frontal Droit ; Temporal Gauche ; Pariétal Central ; Temporal Droit ; Pariéto-Occipital Gauche ; Pariéto-Occipital ; Pariéto-Occipital Droit ; voir figure 3a du chapitre 4 pour la localisation des régions d'intérêt). Comparaison des sujets témoins (tracés noirs) et des sujets dyslexiques (tracés rouges) a. Catégorie cible 'Mot'. b. Catégorie cible 'Pseudo-mot'. Comparaison, pour chaque région du scalp, des conditions 'Hold' (trait plein) et 'Release' (pointillés). Les deux barres verticales sur les axes représentent les délais d'apparition des deux stimuli d'une paire. Pour les deux catégories cible, 3 pics principaux sont observés (P1, N1 et P300) pour les deux conditions attentionnelles.

C.3.c. Analyse 1 : PE après présentation du premier item

Dans cette première analyse, nous avons comparé les effets de cible et de congruence, après présentation du premier item d'une paire, entre les deux groupes de sujets. Cette analyse a été réalisée sur l'onde P300 et la dérive négative de potentiel. Le tableau

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

ci-dessous replace le contexte de l'analyse :

cible	item 1	attention	item 2
M	m	Hold	m
			p
	p	Release	m
			p
P	m	Release	m
			p
	p	Hold	m
			p

Tableau descriptif de l'analyse 1 : l'effet cible (violet versus rouge) et l'effet congruence (translucide versus coloré) sont testés, après présentation du premier item d'une paire.

Les facteurs des ANOVAs sont :

- le groupe, 'Témoins' (T) ou 'Dyslexiques' (D).
- la cible, 'Mot' (M) ou 'Pseudo-mot' (P) – comparaison des conditions [Mmm, Mmp, Mpm, Mpp] versus [Pmm, Pmp, Ppm, Ppp].
- la congruence, 'Congruence' (C) ou 'Non congruence' (NC) – comparaison des conditions [Mmm, Mmp, Ppm, Ppp] versus [Mpm, Mpp, Pmm, Pmp].

L'évènement P300 est maximal dans la région centro-pariétale, à 482 ±54 ms pour les sujets témoins, et à 521 ±69 ms pour les sujets dyslexiques.

Cette onde est significativement plus tardive chez les sujets dyslexiques plutôt que témoins. Sa latence n'est affectée par aucun autre des facteurs testés et par aucune interaction entre ces facteurs.

Son amplitude moyenne est significativement plus grande chez les sujets témoins que chez les sujets dyslexiques. L'onde P300 est aussi plus ample pour les cibles 'Mots' plutôt que 'Pseudo-mots', cette différence étant significative – en analyse post-hoc – en contexte de Non-congruence ($p = .0003$) mais pas en contexte de congruence ($p = .70$) (interaction cible/congruence). De plus, l'interaction groupe/congruence s'explique par une différence significative, entre les deux contextes de congruence, pour les sujets témoins ($p = .03$) et pas pour les sujets dyslexiques ($p = .66$) (figure 6.12).

Figure 6.12 : PE mesurés dans la région centro-pariétale (dérivation linéaire des électrodes C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. Haut. Résultats des sujets témoins. Bas. Résultats des sujets dyslexiques. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende.

P300	Latence	Amplitude moyenne
Effet groupe	F[1,22] = 6.02; p = .02	F[1,22] = 9.70; p = .005
effet de cible	F[1,22] = .73; p = .40	F[1,22] = 13.66; p = .001
effet de congruence	F[1,22] = 3.06; p = .09	F[1,22] = .74; p = .40
Interaction groupe/cible	F[1,22] = .56; p = .46	F[1,22] = 1.88; p = .18
Interaction groupe/congruence	F[1,22] = .91; p = .35	F[1,22] = 8.61; p = .01
Interaction cible/congruence	F[1,22] = .006; p = .94	F[1,22] = 7.62; p = .01

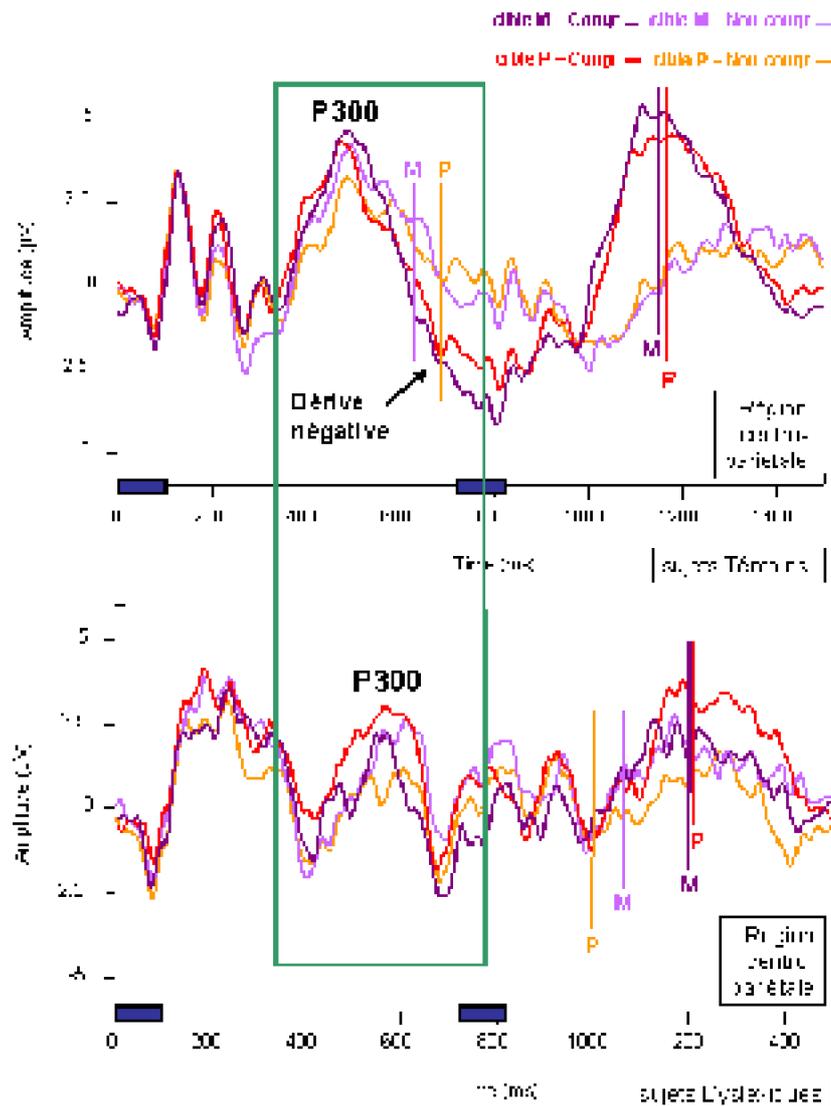


Figure 6.12 : PE mesurés dans la région centro-pariétale (dérivation linéaire des électrodes C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. **Haut.** Résultats des sujets témoins. **Bas.** Résultats des sujets dyslexiques. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les

couleurs des barres faisant référence à la légende.

La dérive négative de potentiel entre la P300 et la présentation du second item (voir figure 6.12) est analysée pour les sujets dyslexiques, de même que pour les sujets témoins : les effets de groupe, de cible et de congruence sont testés – par ANOVAs – sur les amplitudes moyennes de tracés dans l'intervalle [600 – 780] ms, sur les électrodes C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2.

Dérive négative	Amplitude moyenne
<i>effet de groupe</i>	F[1,22] = 5.84; p = .02
<i>effet de cible</i>	F[1,22] = 2.18; p = .15
<i>effet de congruence</i>	F[1,22] = 17.61; p = .000 4
<i>Interaction groupe/congruence</i>	F[1,22] = 6.13; p = .02
<i>Interaction groupe/cible</i>	F[1,22] = .35; p = .56
<i>Interaction cible/congruence</i>	F[1,22] = 11.08; p = .003

L'interaction groupe/congruence est analysée par test post-hoc (*test de Scheffé*) : l'effet de congruence est significatif chez les sujets Témoins ($p = .000 1$) alors qu'il ne l'est pas chez les sujets dyslexiques ($p = .78$). L'analyse post-hoc de l'interaction cible/congruence révèle que l'effet de cible est significatif en cas de congruence entre le stimulus et la cible ($p = .03$) mais pas lorsqu'il y a incongruence ($p = .94$).

La dérive négative de potentiel précédant l'affichage du second item d'une paire est significativement plus ample chez les sujets témoins que chez les sujets dyslexiques. Elle est aussi plus ample en cas de congruence du premier item avec la catégorie cible (stockage de l'information en mémoire et prise de décision différée), pour les sujets témoins mais pas pour les sujets dyslexiques.

De plus, la dérive négative est plus ample pour la catégorie cible 'Mots', uniquement en cas de congruence item/cible.

Après présentation du premier item d'une paire :

- **L'onde P300 est significativement retardée et moins ample chez les sujets dyslexiques par rapport aux sujets témoins.**

- **La P300 est moins ample s'il y a incongruence entre l'item et la catégorie cible, uniquement pour les sujets contrôles. Cette onde est aussi moins ample si les paires de pseudo-mots sont les cibles plutôt que les paires de mots, pour les deux groupes de sujets.**

- **La P300 plus ample pour les cibles 'Mot' et en cas de congruence entre cible et stimulus est suivie d'une forte dérive négative de potentiel jusqu'à la présentation du second item de la paire, pour les sujets contrôles. Cette dérive négative n'est pas significative chez les sujets dyslexiques.**

C.3.d. Analyse 2 : PE après présentation du second item, en condition de maintien d'attention

Dans cette seconde analyse, nous avons étudié les effets de cible et de congruence,

après présentation du second item d'une paire, en condition de maintien de l'attention (condition 'Hold', i.e. le premier item de la paire était congruent avec la cible). Nous avons étudié l'onde P300 (que nous nommerons P300'), en comparant cet évènement entre les deux groupes de sujets. Le tableau ci-dessous replace le contexte de l'analyse :

cible	item 1	attention	item 2
M	m	Hold	m
			p
	p	Release	m
			p
P	m	Release	m
			p
	p	Hold	m
			p

Tableau descriptif de l'analyse 2 : l'effet cible (violet versus rouge) et l'effet congruence (translucide versus coloré) sont testés, après présentation du second item d'une paire.

Les facteurs des ANOVAs sont :

- le groupe, '**Témoins**' (T) ou '**Dyslexiques**' (D).
- la cible, '**Mot**' (M) ou '**Pseudo-mot**' (P) – comparaison des conditions [Mmm, Mmp] versus [Ppm, Ppp].
- la congruence, '**Congruence**' (C) ou '**Non congruence**' (NC) – comparaison des conditions [Mmm, Ppp] versus [Mmp, Ppm].

Pour les sujets témoins, la P300' est maximale dans la région centro-pariétale, à 420 ±63 ms en condition de congruence, et à 480 ±66 ms en condition de non congruence du second item de la paire avec la catégorie cible (sachant que le premier item était congruent). Sa latence est affectée par la congruence mais pas par la cible.

Chez les dyslexiques, l'onde P300' après présentation du second item n'a pas un tracé net (voir figure 6.13). Nous n'étudierons donc pas les effets des différents facteurs sur la latence de la P300', pour le groupe des dyslexiques.

L'amplitude moyenne de la P300' est indépendante des deux facteurs de cible et de congruence, pour les deux groupes de sujets. Par ailleurs, la P300' est significativement moins ample chez les sujets dyslexiques par rapport aux sujets témoins (figure 6.13).

P300'	Latence	Amplitude moyenne
effet de groupe	F[1,22] = .00; p = .97	F[1,22] = 4.63; p = .04
effet de cible	F[1,22] = 1.52; p = .23	F[1,22] = 2.70; p = .11
effet de congruence	F[1,22] = 10.17; p = .004	F[1,22] = .02; p = .88
Interaction	aucune interaction significative	aucune interaction significative

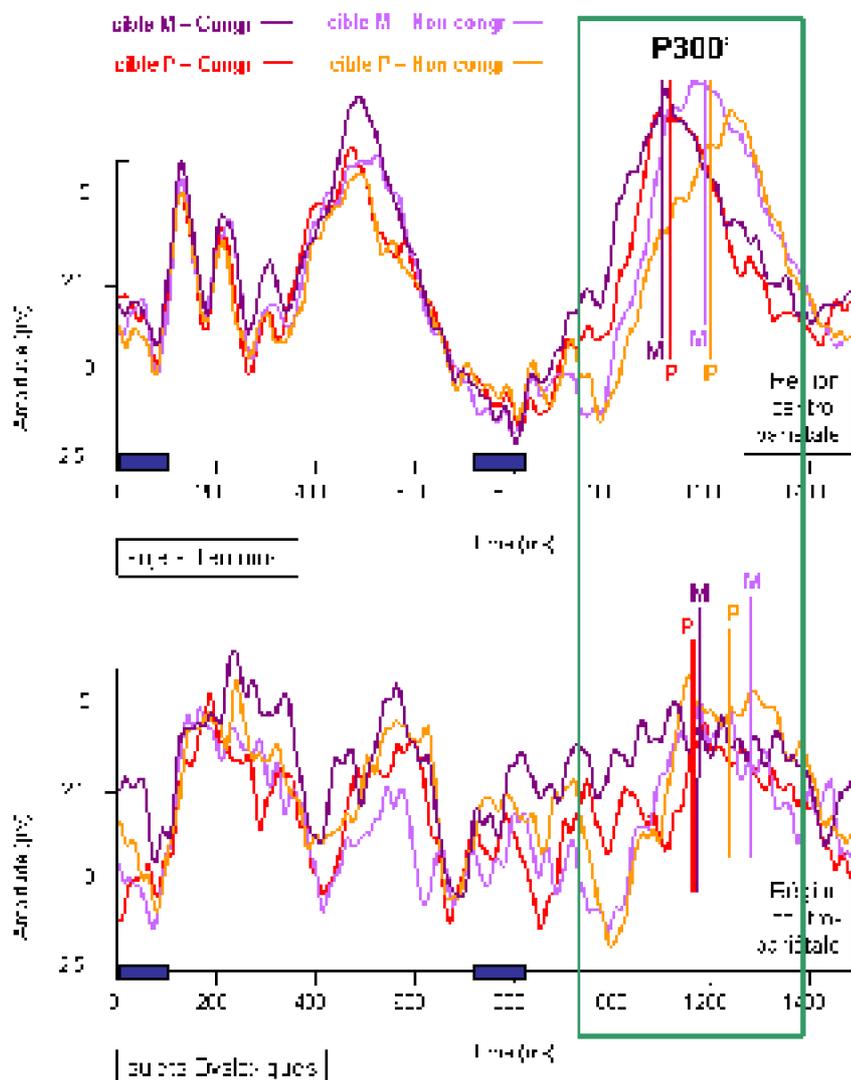


Figure 6.13 : PE mesurés dans la région centro-pariétale (dérivation linéaire des électrodes C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2), pour les deux conditions de congruence et les deux catégories cible. **Haut.** Résultats des sujets témoins. **Bas.** Résultats des sujets dyslexiques. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende.

Après présentation du second item d'une paire (lorsque le premier item était congruent avec la cible et que le sujet a donc maintenu son attention) :

- La P300 est retardée s'il y a incongruence entre l'item et la catégorie cible, chez les sujets témoins.
- Son amplitude moyenne est indépendante des deux facteurs de cible et de congruence, pour les deux groupes de sujets.

- Par ailleurs, la P300 est significativement moins ample chez les sujets dyslexiques par rapport aux sujets témoins.

C.3.e. Analyse 3 : PE après présentation du second item, en fonction du maintien ou du relâchement de l'attention

Dans cette dernière analyse, nous avons étudié les effets de cible et de soutien d'attention, après présentation du second item d'une paire, selon que le sujet ait maintenu son attention (condition 'Hold', i.e. le premier item de la paire était congruent avec la catégorie cible, le sujet doit traiter le second item pour prendre sa décision) ou bien relâcher son attention (condition 'Release', i.e. le premier item de la paire était incongruent avec la catégorie cible, le sujet ne doit pas nécessairement traiter le second item pour répondre). Nous avons à nouveau comparé l'onde P300 (nommée P300'') entre les deux groupes de sujets. Le tableau ci-dessous replace le contexte de l'analyse :

cible	item 1	attention	item 2
M	m	Hold	m
			p
	p	Release	m
			p
P	m	Release	m
			p
	p	Hold	m
			p

Tableau descriptif de l'analyse 3 : l'effet cible (violet versus rouge) et l'effet de soutien de l'attention (translucide versus coloré) sont testés, après présentation du second item d'une paire.

Les facteurs des ANOVAs sont :

- le groupe, '**Témoins**' (T) ou '**Dyslexiques**' (D).
- la cible, '**Mot**' (M) ou '**Pseudo-mot**' (P) – comparaison des conditions [Mmm, Mmp, Mpm, Mpp] *versus* [Pmm, Pmp, Ppm, Ppp].
- le soutien de l'attention, '**Hold**' (H) ou '**Release**' (R) – comparaison des conditions [Mmm, Mmp, Ppm, Ppp] *versus* [Mpm, Mpp, Pmm, Pmp].

La P300'' est maximale dans la région centro-pariétale. Sa latence n'est pas étudiée dans cette analyse, puisqu'elle n'a pas réellement de signification : en effet, le pic P300 n'est pas observé en condition 'Release' chez les sujets témoins, et elle est difficilement identifiable chez les sujets dyslexiques quelle que soit la condition.

Son amplitude moyenne est indépendante de la catégorie cible. Cette onde est par ailleurs significativement moins ample en condition 'Release' par rapport à la condition

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

'Hold', chez les sujets témoins uniquement. En effet, l'interaction groupe/soutien d'attention est analysée par test post-hoc (*test de Scheffé*) : les deux conditions d'attention sont significativement différentes chez les sujets témoins ($p < 10^{-6}$), pas chez les sujets dyslexiques ($p = .34$) (voir la figure 6.14).

P300''	Amplitude moyenne
<i>effet de groupe</i>	F[1,22] = .01; p = .91
<i>effet de cible</i>	F[1,22] = 1.63; p = .21
<i>effet de soutien d'attention</i>	F[1,22] = 52.15; p < 10 ⁻⁶
<i>Interaction groupe/cible</i>	F[1,22] = .16; p = .69
<i>Interaction groupe/soutien d'attention</i>	F[1,22] = 17.34; p = .000 4
<i>Interaction cible/soutien d'attention</i>	F[1,22] = 2.96; p = .10

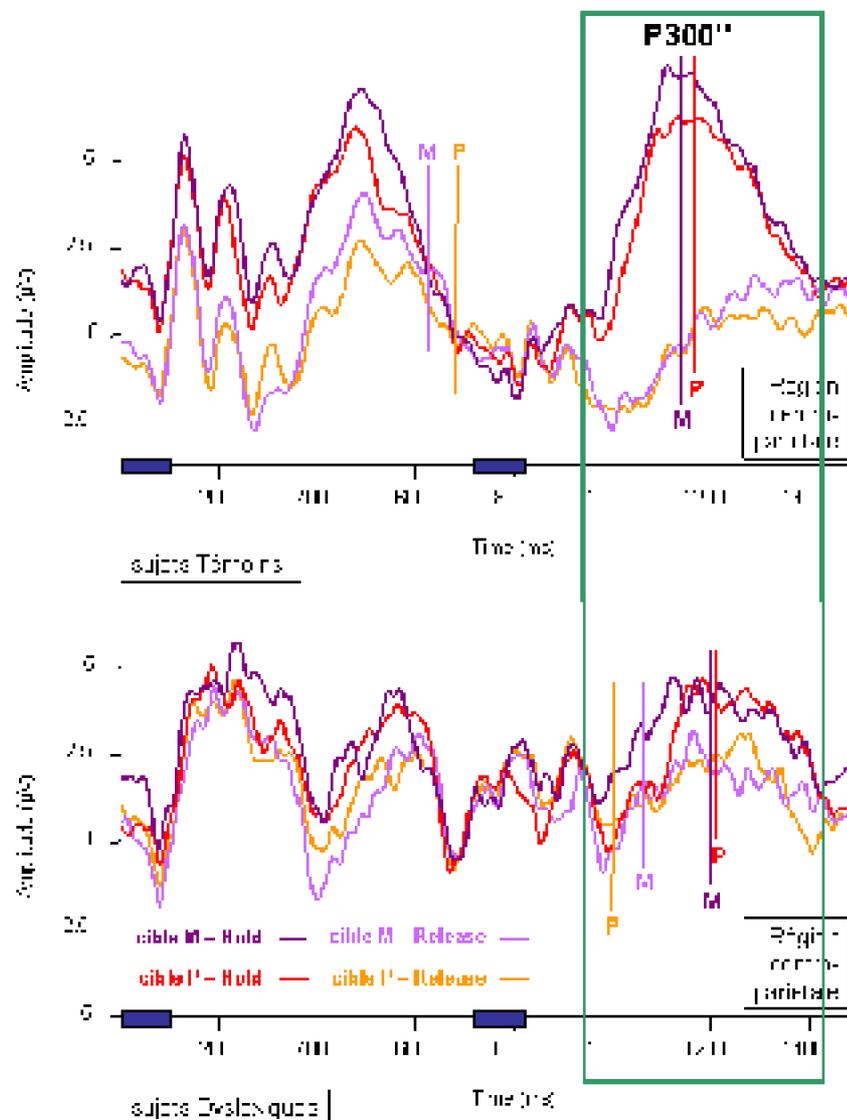


Figure 6.14 : PE mesurés dans la région centro-pariétale (dérivation linéaire des électrodes C1, CP1, Cz, CPz, C2, CP2), pour les deux conditions de congruence et les deux

catégories cible. Haut. Résultats des sujets témoins. Bas. Résultats des sujets dyslexiques. Les temps d'exposition des deux items successifs d'une paire sont matérialisés par des rectangles bleus. La région d'intérêt est indiquée par un encadrement vert. Les temps de réaction sont indiqués par des barres verticales sur les tracés, les couleurs des barres faisant référence à la légende.

Après présentation du second item d'une paire, que le sujet ait maintenu son attention (condition 'Hold') ou non (condition 'Release') :

- Pour les sujets témoins, la P300 est inexistante en condition de relâchement de l'attention, indépendamment de la catégorie cible.
- Pour les sujets dyslexiques, la P300 ne diffère pas en fonction du soutien de l'attention, elle est quasi-inexistante dans les deux conditions.

C.4. Discussion

C.4.a. Variations de l'onde P300 entre les deux groupes de sujets, après présentation du premier item d'une paire

Quelles que soient les conditions d'attention sélective et de congruence, l'onde P300 est significativement retardée et moins ample chez les sujets dyslexiques par rapport aux sujets contrôles. Ceci est congruent avec nos hypothèses, ces mêmes observations ayant déjà été rapportées par différents auteurs (Holcomb et al., 1986; Lovrich and Stamm, 1983; Taylor and Keenan, 1990).

Si la latence de la P300 reflète le temps de catégorisation d'un stimulus (Kutas et al., 1977; McCarthy and Donchin, 1981; Polich, 1986), et si son amplitude reflète la charge attentionnelle allouée à ce traitement (Kramer and Strayer, 1988; Wickens et al., 1983), nous pouvons déduire que la population de sujets dyslexiques testée nécessite plus de temps que les sujets normo-lecteurs pour catégoriser des stimuli langagiers, et souffre par ailleurs d'un déficit en ressource attentionnelle.

Les effets de l'attention sélective sur la charge attentionnelle ne diffèrent pas significativement entre les sujets témoins et dyslexiques. Par ailleurs, la congruence d'un stimulus avec la catégorie cible induit des variations significatives de la charge attentionnelle chez les sujets témoins, pas chez les sujets dyslexiques.

Les effets de congruence proviennent de la mise en correspondance du résultat du traitement de l'item avec la catégorie cible (l'item ayant été traité, est-ce qu'il correspond à la catégorie linguistique sur laquelle est focalisée l'attention sélective ou non ?). Or, nous avons vu précédemment que l'attention sélective des sujets dyslexiques n'est pas déficitaire pour le traitement étudié. Il semble donc que la différence entre les deux groupes de sujets pour les effets de congruence provienne d'un déficit, pour les sujets dyslexiques, dans le traitement des séquences de lettres.

Les résultats de cette expérience ne nous permettent pas de définir quel(s) stade(s) de traitement est (sont) déficitaire(s) chez les sujets dyslexiques. Nous ne pouvons pas non plus définir si le déficit provient d'un défaut ou d'un retard dans le traitement : au

moment où le 'matching' entre le stimulus et la catégorie cible devrait se faire, ou bien le traitement de l'item a été déficitaire, ou bien il n'est pas achevé. Toutefois, nous pouvons émettre des hypothèses :

(1) Salmelin et al. ont montré dans différentes études en MEG que les sujets dyslexiques ne diffèrent pas des normo-lecteurs pour le traitement des traits visuels (environ 100 ms après présentation du stimulus). Par contre, les ondes reflétant le traitement des lettres et le traitement des mots (150 et 200 ms environ après l'onset) sont retardées et moins amples (Salmelin et al., 2000; Salmelin et al., 1996).

(2) Notre étude sur les effets Top-down lexicaux chez les sujets dyslexiques – présentée précédemment dans ce chapitre – nous a permis de mettre en évidence que les phases de traitement des lettres et des mots étaient déficientes chez les sujets dyslexiques, la phase de traitement des traits visuels étant 'épargnée'.

(3) Bien que les données soient trop bruitées pour être analysées statistiquement, on voit sur la figure 6.11 (flèches rouges) que l'onde P1 semble identique chez les sujets témoins et dyslexiques, alors que l'onde N1 n'est pas observé sur les tracés de PE des sujets dyslexiques.

Il est donc probable que, dans notre étude, les stades de traitement des lettres des séquences, et des séquences elles-mêmes, soient déficientes, induisant un retard dans le traitement. Par ailleurs, Taylor & Keenan ont montré que les enfants dyslexiques mettent plus de temps que les enfants normo-lecteurs à traiter l'information visuelle (Taylor and Keenan, 1990) : il est donc possible que les sujets dyslexiques de notre étude souffrent d'un retard plus que d'un défaut de traitement de l'information.

C.4.b. Variations de l'onde P300 entre les deux groupes de sujets, après présentation du second item d'une paire

Après présentation du second item d'une paire, l'onde P300 est quasi-inexistante chez les sujets dyslexiques, quelles que soient les conditions attentionnelles. Il semble que les sujets dyslexiques subissent systématiquement les effets d'un 'blink attentionnel' sur le second item des paires.

Nous avons vu que, chez les sujets dyslexiques, le traitement des séquences de lettres (en première position d'une paire) est déficitaire, et le temps de catégorisation de ces séquences est retardé. De plus, les temps de réaction en condition 'Release' – lorsque le sujet répond après présentation du premier item d'une paire – sont significativement plus grands que chez les sujets témoins. On voit sur les figures 6.12 et 6.14 que les réponses des sujets interviennent après l'affichage à l'écran du second item de la paire. Ainsi, le traitement du premier item d'une paire et la prise de décision – de maintenir ou relâcher son attention – sont significativement plus longs chez les sujets dyslexiques par rapport aux sujets témoins, et implique que le second item de la paire est affiché à l'écran alors que ces différentes tâches cognitives ne sont pas achevées. Ceci explique que le second item d'une paire serait mal perçu par les sujets dyslexiques, ce qui provoquerait un effet typique de 'blink attentionnel' sur la P300, quelles que soient les conditions de soutien d'attention, d'attention sélective ou de congruence (Raymond et al., 1992; Vogel et al., 1998).

Cette interprétation des résultats de Potentiels Evoqués est concordante avec les résultats comportementaux : si le deuxième item d'une paire n'est pas perçu par les sujets dyslexiques – qui n'ont pas achevé le traitement du premier item au moment de son affichage à l'écran – la décision lexicale est difficilement réalisable sur ces items, induisant des taux d'erreurs très élevés en condition 'Hold' (prise de décision et réponse après le second item).

Nous observons tout de même une onde P300 plus ample pour les conditions 'Hold' et 'Release' chez les dyslexiques que pour la condition 'Release' chez les sujets témoins (voir figure 6.14).

Nous avons conclu dans cette même étude réalisée chez les sujets témoins (voir chapitre 5) qu'aucune onde P300 n'était observée après présentation du second item d'une paire, en condition 'Release' pour deux raisons majeures : (1) les sujets témoins subissent un 'blink attentionnel' sur le second item d'une paire, lorsqu'ils sont en train de donner leur réponse, i.e. en condition 'Release' uniquement. (2) De plus, nous supposons que les témoins – se conformant à l'esprit du paradigme – ne traitent pas volontairement le second item d'une paire, lorsque la catégorie du premier item leur a permis de prendre une décision sans avoir à traiter le second item.

Il semble que pour les dyslexiques ces deux facteurs aient des incidences différentes, ce qui induit des tracés de potentiels très différents : (1) l'effet de 'blink attentionnel' est subi par les sujets dyslexiques autant dans la condition 'Hold' que dans la condition 'Release', puisqu'ils sont dans les deux cas encore en train de traiter le premier item quand le second est affiché à l'écran. (2) Nous supposons que les dyslexiques ne peuvent se conformer à l'esprit du paradigme – la tâche étant trop complexe et trop rapide – et qu'ils ont donc tendance à traiter chaque item d'une paire de manière identique, que ce traitement soit nécessaire ou non à la réalisation de la tâche. Ainsi, une onde P300 de faible amplitude est observée chez les sujets dyslexiques – après présentation du second item d'une paire, pour les conditions 'Hold' et 'Release' – puisqu'ils tentent de traiter volontairement cet item, que ce soit nécessaire ou non.

Enfin, nous pouvons faire une dernière observation concernant l'onde P300 observée après présentation du second item d'une paire : On voit sur la figure 6.11 que cette onde est quasi inexistante chez les sujets dyslexiques par rapport aux sujets contrôles, sauf pour la condition 'Cible pseudo-mots-Hold' – lorsque les sujets doivent repérer les paires de pseudo-mots, et que le premier item de la paire était un pseudo-mot, entraînant le sujet à maintenir son attention pour traiter le second item de la paire. S'ajoutent à cette observation deux résultats comportementaux importants : (1) on voit sur la figure 6.12 que les sujets témoins répondent, en condition 'Release', plus vite pour les cibles 'Mots' que pour les cibles 'Pseudo-mots'. Le résultat inverse est observé chez les sujets dyslexiques : ils sont plus rapides et font moins d'erreurs (voir les résultats comportementaux sur la figure 6.9) quand ils sont attentifs aux pseudo-mots plutôt qu'aux mots. (2) De plus, en condition 'Hold', les sujets dyslexiques font beaucoup moins d'erreurs si les cibles sont les pseudo-mots plutôt que les mots (comparaison des conditions MH et PH sur la figure 6.9).

Ainsi, il semble que le 'blink attentionnel' subi par les sujets dyslexiques – induisant

une onde P300 très faible après présentation du second item d'une paire – soit moins important lorsque les pseudo-mots sont les cibles. Ceci induit une P300 quasi identique, pour cette condition, entre sujets témoins et dyslexiques, ainsi que des taux d'erreurs plus faibles, chez les dyslexiques, pour cette catégorie cible plutôt que l'autre. Ce 'blink attentionnel' réduit pourrait être dû au fait que les sujets dyslexiques traitent plus rapidement les items lorsqu'ils focalisent leur attention sur les pseudo-mots, ce qui induit des réponses plus rapides en contexte 'cibles Pseudo-mots' plutôt que 'cibles Mots', et donc une meilleure perception du second item d'une paire.

C.4.c. Charge en mémoire de travail chez les sujets témoins et dyslexiques

Si la dérive négative de potentiel entre l'onde P300 et la présentation du second item d'une paire est induite par le stockage d'information en mémoire de travail (Naatanen et al., 1992; Thierry et al., 2003a; Thierry et al., 1998; Thierry et al., 2003b), ce stockage d'information est déficitaire chez les sujets dyslexiques (pour lesquels cette dérive négative n'est pas observée).

Deux explications peuvent être avancées, et nos résultats ne nous permettent pas d'en privilégier une : (1) les sujets dyslexiques testés dans cette étude semblent souffrir d'un déficit de stockage d'informations linguistiques en mémoire de travail. (2) Une autre hypothèse serait que, au niveau de la fenêtre temporelle [600 – 780] ms, les sujets dyslexiques n'ont pas achevé le traitement et la catégorisation du premier item d'une paire, et sont donc dans l'incapacité de stocker en mémoire de travail les informations concernant cet item, avant la présentation du second item de la paire.

Sans pouvoir privilégier une des deux hypothèses, nous pouvons tout de même supposer que les sujets dyslexiques souffrent d'un déficit de la mémoire de travail, ce résultat ayant été souvent décrit dans la littérature (Demonet et al., 2004; Jeffries and Everatt, 2004; Kibby et al., 2004; Ramus, 2001).

C.5. Conclusion

Différentes observations importantes ressortent de cette étude sur les effets "Top-down" attentionnels chez des sujets adultes dyslexiques :

(1) les sujets dyslexiques testés dans cette expérience souffrent de déficits dans le traitement des stimuli linguistiques, sans que nous ne puissions préciser quel est le niveau de traitement atteint, et s'il est totalement déficitaire ou uniquement retardé par rapport à des sujets normo-lecteurs. Il est tout de même probable que les troubles des sujets dyslexiques proviennent de déficiences dans les phases de traitement des lettres des séquences linguistiques, et de traitement des séquences linguistiques elles-mêmes.

(2) Par ailleurs, le temps de catégorisation des mots et des pseudo-mots est significativement plus long chez les sujets dyslexiques comparés aux sujets témoins. Nous ne pouvons spécifier si le processus de catégorisation est lui-même déficitaire, ou bien si ce traitement est retardé du fait d'un retard dans les phases de traitement de la séquence.

(3) Ces deux premières observations ont pour conséquence que les sujets dyslexiques souffrent de troubles importants dans le traitement de stimuli linguistiques présentés successivement. Lorsque deux stimuli sont présentés visuellement avec un délai de 720 ms entre les deux, les sujets dyslexiques subissent un effet de 'blink attentionnel' sur le second item. Cette observation est concordante avec une précédente étude révélant que les sujets dyslexiques ont des difficultés à discriminer deux stimuli visuels présentés séquentiellement, une présentation simultanée n'induisant pas de difficulté de traitement particulière (voir (Ramus, 2001)).

(4) Pour finir, les sujets dyslexiques semblent souffrir d'un déficit de stockage d'information linguistique en mémoire de travail, même si cette observation ne peut être affirmée.

Les principaux résultats obtenus sont résumés dans la figure 6.15, présentée ci-dessous.

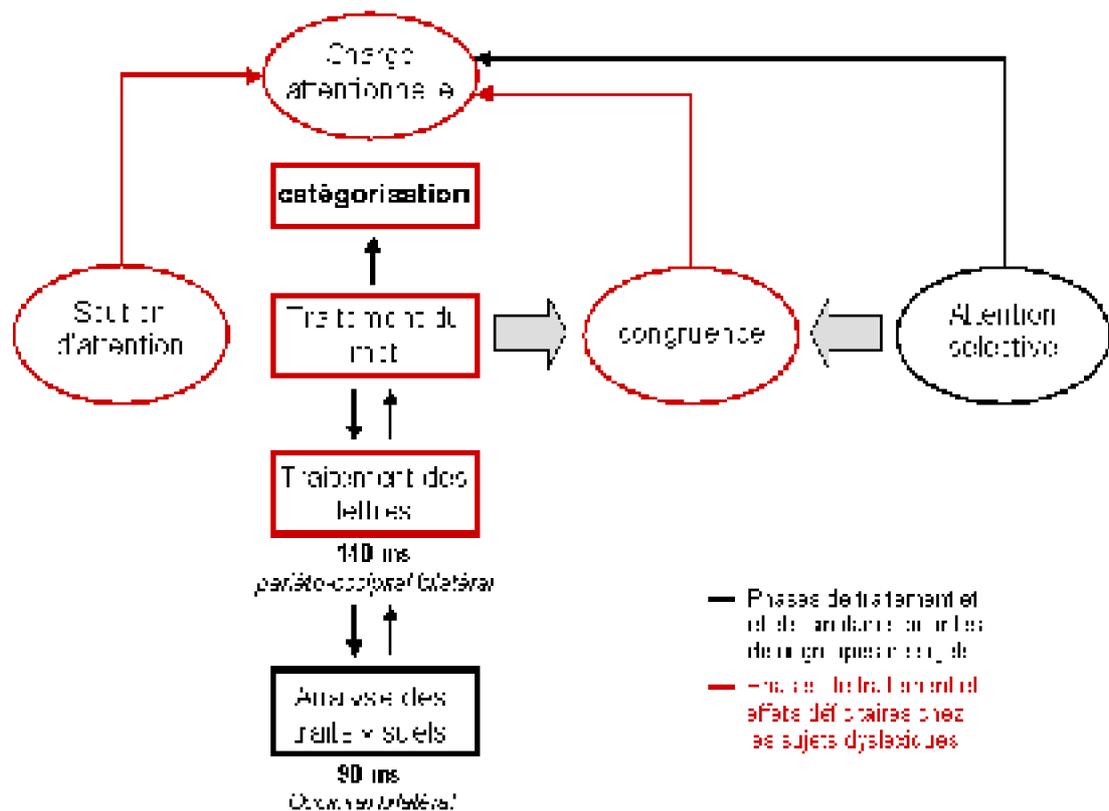


Figure 6.15 : Schéma de synthèse des effets "Top-down" influençant la décision lexicale,

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

chez des sujets adultes normo-lecteurs ou dyslexiques.

Chap 7. Synthèse des travaux

A. Discussion générale

Les différentes études décrites dans ce manuscrit permettent de proposer un modèle de reconnaissance visuelle de mots isolés, avec différents effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant les différentes phases de traitement. Nous allons tout d'abord présenter notre modèle puis en décrire les différentes étapes et influences de facteurs visuels, temporels, lexicaux et attentionnels.

Le modèle proposé est bien sûr incomplet, puisqu'il ne comprend que les phases de traitement et les facteurs influant que nous avons étudié dans les différentes expériences décrites. Entre autre, les phases d'analyse des séquences de lettres de ce modèle ne comprennent pas les traitements phonologiques et sémantiques. D'autres résultats d'études devraient être ajoutés pour compléter ce schéma. Par ailleurs, les facteurs influençant le traitement ne sont pas exhaustifs : de nombreux autres facteurs influent sur le traitement des mots. Enfin, les effets "Top-down" et "Bottom-up" décrits ne sont pas nécessairement les seuls : par exemple, nous ne prétendons pas qu'il n'existe aucune influence du soutien d'attention sur l'étape de traitement des séquences de lettres, cet effet n'a simplement pas pu être testé de par les limites des expériences.

Nous allons donc commenter et analyser le schéma synthétique présenté sur la

figure 7.1, en gardant à l'esprit que les facteurs étudiés peuvent influencer sur d'autres phases de traitement que celles identifiées, et que les effets d'autres facteurs doivent être combinés à ceux-ci pour expliquer la lecture.

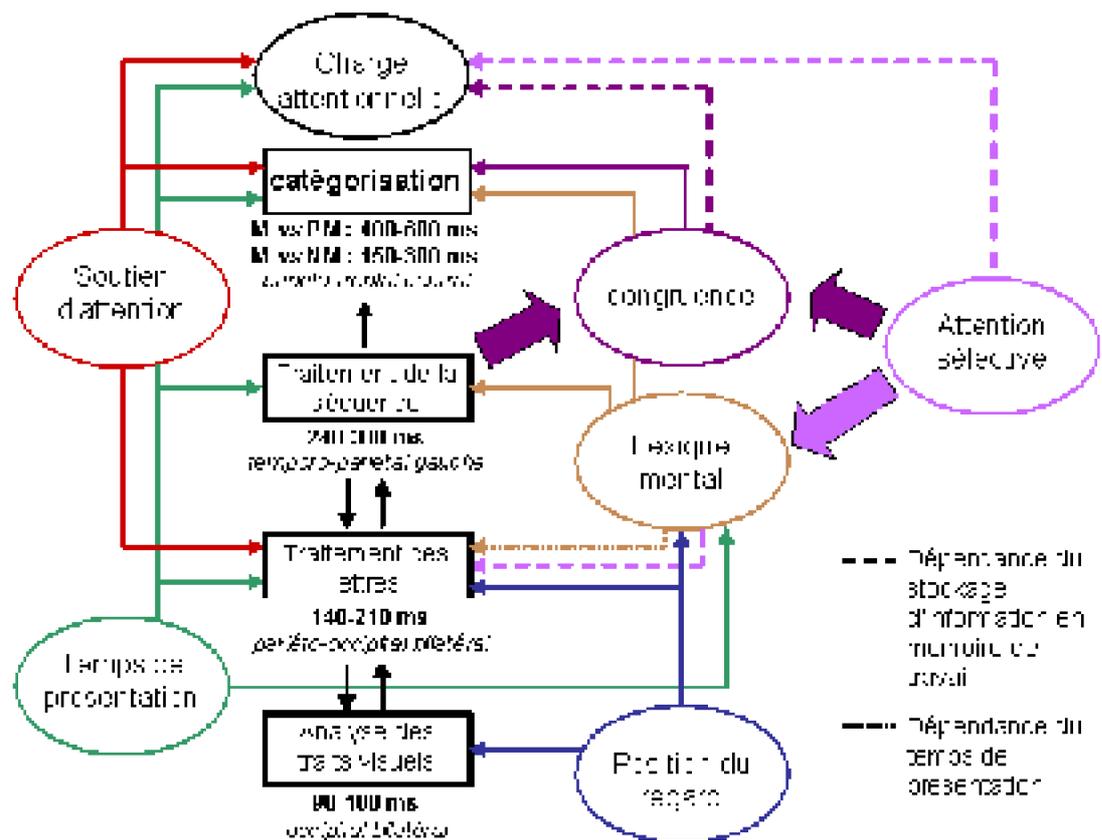


Figure 7.1 : Modèle du traitement visuel de séquences de lettres

Différents stades de traitement des séquences de lettres.

La reconnaissance d'un mot isolé présenté en modalité visuelle se ferait en trois phases principales (voir le modèle IAM ; (McClelland and Rumelhart, 1981)) : (1) le traitement des traits visuels de la séquence de lettres aurait lieu dans les régions occipitales bilatérales, 90 à 100 ms après présentation de la séquence (Cohen et al., 2000; Proverbio et al., 2002a; Proverbio et al., 2004). (2) Le traitement des lettres composant le stimulus linguistique visuel se ferait en 140 à 210 ms après présentation, dans les régions pariéto-occipitales bilatérales (Bentin et al., 1999; Cornelissen et al., 2003; Nobre et al.,

1994; Pammer et al., 2004; Proverbio et al., 2002a). (3) Le mot serait analysé en 240-300 ms après sa présentation, dans la région temporo-pariétale gauche (Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002; Pammer et al., 2004; Petersen et al., 1990; Proverbio et al., 2002a; Salmelin et al., 1996; Tarkiainen et al., 1999).

Ces trois phases de traitement interactives mèneraient à la catégorisation du stimulus – induisant une activation cérébrale dans la région pariéto-frontale centrale –, en un temps variable selon que les mots à identifier sont présentés alternativement avec des pseudo-mots ou des non-mots : la catégorisation de mots *versus* non-mots se ferait en 150-300 ms, la catégorisation de mots *versus* pseudo-mots en 400 à 600 ms.

Cette description 'linéaire' des évènements ne remet pas en question l'idée d'un traitement parallèle et distribué : au sein de ce réseau, une phase de traitement pourrait débuter avant l'achèvement de la phase précédente. Le transfert d'information pourrait se faire des couches de 'bas niveau' à celles de 'haut niveau', mais aussi en sens inverse.

Il n'en demeure pas moins qu'une certaine séquentialité est mise en évidence. Ceci peut s'expliquer par le fait que le traitement de traits visuels s'achève plus rapidement que le traitement de lettres. De la même façon, bien que les traitements puissent débuter simultanément, il est probable que le traitement des lettres d'une séquence soit réalisé plus rapidement que le traitement de la séquence elle-même, cette dernière analyse étant plus coûteuse, du fait de l'interaction mise en place avec le contenu du lexique mental par exemple. Il semble aussi évident que la catégorisation d'un stimulus linguistique ne puisse être achevée avant le traitement des lettres de ce stimulus.

Par ailleurs, nous proposons que cette séquentialité induise des limitations dans l'interaction entre les différentes phases de traitement. Ainsi, sans remettre en cause l'idée d'une influence des phases de traitement 'haut niveau' sur les phases de traitement 'bas niveau', cette interactivité doit être limitée : par exemple, nous avons observé dans l'étude des effets "Top-down" attentionnels que la catégorisation d'un stimulus n'influence pas les phases de traitement de ses traits visuels ou de ses lettres (voir au chapitre 5, pas d'effet significatif du facteur de congruence sur ces deux stades de traitement). Il est probable que le traitement des traits visuels et des lettres soit achevé au moment où la catégorisation de l'item est réalisée, aucun effet "Top-down" n'étant donc possible ni nécessaire.

Décours temporel des différents stades de traitement.

Les deux expériences en Potentiels Evoqués décrites dans ce mémoire nous ont permis de définir, pour chacune d'elles, la temporalité des différentes phases de traitement des séquences de lettres. Le premier constat que nous pouvons faire est que ce décours temporel est très variable selon les conditions expérimentales.

Le stade de traitement des traits visuels est réalisé en 90 à 100 ms dans nos deux études. Cette phase est la seule à peu fluctuer dans le temps, probablement du fait qu'elle est indépendante de la majorité des facteurs "Bottom-up" et "Top-down" (voir dans la suite de cette discussion). Les données de la littérature sont d'ailleurs très congruentes à ce sujet, l'onde P1 étant décrite dans la majorité des articles comme ayant un pic moyen à

100 ms environ après présentation du stimulus (Cohen et al., 2000; Halit et al., 2000; Itier and Taylor, 2002; Itier and Taylor, 2004; Proverbio et al., 2002b; Proverbio et al., 2004).

L'achèvement du stade de traitement des lettres d'une séquence est beaucoup plus aléatoire et dépendant de différents facteurs : dans notre étude sur les effets "Top-down" lexicaux (chapitre 4), l'onde N1 induite par des séquences de lettres présentées 50 ou 66 ms et masquées est maximale 180 à 210 ms après présentation des séquences (avec une forte dépendance au temps de présentation). Dans l'étude sur les effets "Top-down" attentionnels, les séquences de lettres présentées 100 ms et non masquées induisent une onde N1 environ 140 ms après stimulation. La comparaison de ces deux études met en avant l'importance de la prise en compte des conditions expérimentales dans l'analyse des résultats. Le temps de présentation des stimuli linguistiques et le fait qu'ils soient masqués ou non induisent des temps de traitement des lettres pouvant varier de 140 à 210 ms. Ceci explique le fait que les données de la littérature soient divergentes sur le déroulement temporel de la phase de traitement pré-lexical, allant en général de 140 à 200 ms selon les études (Bentin et al., 1999; Cornelissen et al., 2003; Nobre et al., 1994; Pammer et al., 2004; Proverbio et al., 2002a)

Le stade de traitement des séquences de lettres n'a pu être analysé que dans l'étude sur les effets "Top-down" lexicaux. Dans cette étude, nous avons émis l'hypothèse que le traitement lexical était réalisé par les sujets en 240 à 300 ms. Dans la littérature, la temporalité de cette activation est rapportée entre 180 et 250 ms selon les études (Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002; Pammer et al., 2004; Petersen et al., 1990; Proverbio et al., 2002a; Salmelin et al., 1996; Tarkiainen et al., 1999). La variabilité de l'achèvement de cette phase de traitement selon les conditions expérimentales est ainsi encore mise en évidence.

Pour finir, nous avons relevé dans nos deux expériences des temps de catégorisation de 150-300 ms dans la première, de 400-600 ms dans la seconde. Il est probable, une nouvelle fois, que les effets "Bottom-up" variables selon les conditions expérimentales entraînent de telles variations de déroulement temporel. Mais nous pouvons ajouter aussi l'influence de type lexical : dans l'étude des effets "Top-down" lexicaux, les stimuli présentés aux sujets étaient des mots ou des non-mots, alors que dans l'étude des effets "Top-down" attentionnels, les stimuli étaient des mots ou des pseudo-mots. Ainsi, la catégorisation de mots *versus* non-mots serait achevée en 150 à 300 ms, alors que la catégorisation de mots *versus* pseudo-mots nécessiterait 400 à 600 ms pour être achevée. Cette observation est congruente avec le fait que mots et non-mots sont plus facilement identifiables comme n'appartenant pas à la même catégorie linguistique que mots et pseudo-mots. Le temps de catégorisation est donc probablement fortement dépendant du facteur lexical, même si les influences "Bottom-up" telles que le temps de présentation ont aussi une incidence non négligeable.

Effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant le stade de traitement des traits visuels d'une séquence de lettres.

L'onde P1 reflétant le stade d'extraction des traits visuels d'une séquence de lettres est dépendante de la quantité d'information contenue dans un hémichamp visuel : au-dessus d'un certain seuil de quantité d'information visuelle, une onde P1 est observée, environ 100 ms après stimulation, dans l'hémisphère controlatéral à cette stimulation. Si la quantité d'information ne dépasse pas le seuil – dans le cas particulier de notre étude – de 1.5 lettres, aucune onde P1 n'est produite (elle sera observée avec un certain délai du au transfert d'information d'un hémisphère à l'autre) (voir (Brysbaert, 1994; Brysbaert, 2004)). L'onde électrophysiologique P1 est ainsi fortement dépendante de la position du regard dans la séquence de lettres, indépendamment de tout facteur lexical.

Une étude avec un contrôle plus précis de la quantité de lettres d'un mot projetée dans chaque hémichamp visuel permettrait de définir un seuil plus exact d'information linguistique nécessaire à une activation du cortex strié controlatéral. En effet, notre étude nous permet uniquement de proposer que ce seuil se situe entre 0.5 et 1.5 lettres par hémichamp visuel.

Si la quantité d'information visuelle dépasse le seuil critique, l'extraction des traits visuels de cette information sera réalisée, indépendamment de tout autre facteur : (1) la catégorie des stimuli et leur temps de présentation, (2) la pré-activation du lexique mental, (3) l'attention sélective et (4) le soutien de l'attention n'influent pas sur cette phase de traitement.

(1) Le traitement des traits visuels peut varier si les stimuli sont de catégories visuellement très différentes (mots, visages, images de voitures ; voir (Rossion et al., 2003)) mais demeure indépendant de variations fines au sein d'une même catégorie. Aucune discrimination entre mots, pseudo-mots et non-mots ne peut être réalisée à ce stade de l'analyse, ce qui est en accord avec les données de la littérature (Rossion et al., 2003; Simon et al., 2004). Nous ajoutons à ces données le fait que ce traitement est aussi indépendant du temps de présentation des stimuli linguistiques.

(2) La pré-activation du lexique mental n'influence pas le stade de traitement des traits visuels d'un mot. Ceci confirme le fait que mots, pseudo-mots et non-mots induisent des ondes P1 identiques. De plus, ceci permet d'émettre l'hypothèse que le traitement des traits visuels est achevé lorsque les influences "Top-down" lexicales sont mises en place. La pré-activation du lexique mental ne pourrait donc influencer le traitement des mots dans les 100 premières ms après stimulation.

Différentes études sur l'apprentissage perceptif proposent que la vision répétée d'un même stimulus à une même position procure au système le moyen de reconnaître ensuite rapidement et efficacement les configurations visuelles fréquemment rencontrées (Sigman and Gilbert, 2000). Selon cette théorie, le fait qu'un mot soit mieux reconnu s'il est fixé à gauche de son centre proviendrait du fait qu'il a été le plus souvent vu, au cours de l'apprentissage, dans cette position donnée (Nazir et al., 2004). L'influence lexicale lors de la reconnaissance ultérieure d'un mot proviendrait alors d'une influence de type "Bottom-up" plutôt que "Top-down". Le fait que l'onde P1 soit indépendante des facteurs lexicaux semble privilégier l'idée d'une influence "Top-down". Mais aucune certitude n'existe encore puisque certaines études révèlent l'existence d'effets lexicaux au niveau de l'onde P1 (Serenio et al., 1998).

La réplication de l'expérience utilisant le paradigme de Reicher-Wheeler devrait être testée, à nouveau en Potentiels Evoqués, avec des stimuli présentés horizontalement et verticalement. Si les effets lexicaux sont des effets de type "Top-down", ils ne devraient pas dépendre du format de présentation des stimuli. A l'inverse, si ces effets lexicaux facilitateurs sont de type "Bottom-up", ils seront à l'œuvre pour des stimuli présentés de manière standard mais ne seront pas observés si les stimuli sont affichés à l'écran verticalement.

(3) Les données de la littérature révèlent que la P1 peut être influencée par des effets "Top-down" attentionnels pour des stimuli simples, tels que des objets, des visages et des photos d'animaux (Taylor, 2002). D'après nos résultats, il semble qu'elle ne le soit pas quand les stimuli sont des séquences linguistiques très proches orthographiquement.

La reproduction de l'étude sur les effets "Top-down" attentionnels, dont les stimuli seraient des mots et des non-mots, permettrait d'affiner ce résultat : nous faisons l'hypothèse que les effets attentionnels influent sur l'onde P1 uniquement lorsque les catégories mises en jeu dans l'expérience sont facilement discriminables. Ainsi, les mots et pseudo-mots étant très proches orthographiquement, aucun effet attentionnel ne module l'évènement P1 lors de leur traitement. Il est probable que ce même évènement serait modulé par l'attention si les stimuli utilisés dans la même expérience étaient des mots et des non-mots.

(4) En plus d'être indépendant d'un certain nombre de facteurs "Bottom-up" et "Top-down", le traitement des traits visuels d'une séquence de lettres est parfaitement automatisé, puisqu'il ne dépend pas du soutien de l'attention du sujet au cours de la tâche.

Effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant le stade de traitement des lettres d'une séquence linguistique.

L'onde N1 – reflétant le stade de traitement des lettres d'une séquence – est dépendante (1) du temps de présentation des séquences, de la position du regard dans la séquence et du soutien de l'attention. Elle est aussi dépendante (2) de la pré-activation du lexique mental, mais uniquement pour des temps de présentation suffisamment élevés, et une position optimale du regard dans la séquence. De plus, elle est influencée par la pré-activation du lexique mental, lorsque l'attention sélective est portée sur la catégorie linguistique des mots, uniquement s'il y a eu amorçage du traitement lexical et de la mémoire de travail.

(1) L'évènement N1 est retardé et moins ample si le temps d'exposition des stimuli linguistiques est augmenté. Dans un autre contexte expérimental, il est aussi retardé et moins ample lorsque les stimuli sont vus passivement, sans traitement volontaire. Dans les deux cas, le traitement est moins 'coûteux', que ce soit parce qu'il est facilité par un temps d'exposition plus long ou que ce soit parce qu'il n'implique aucune attention de la part du sujet.

Bien que fortement dépendant des facteurs temporels et attentionnels, ce traitement est tout de même automatique. En effet, sans aucun soutien d'attention de la part du

sujet, le traitement des lettres de la séquence est tout de même réalisé.

(2) La pré-activation du lexique mental peut influencer la reconnaissance visuelle d'un mot isolé dès le stade de traitement des lettres du mot. Mais il faut noter encore l'importance des conditions expérimentales : cet effet "Top-down" facilitateur semble ne pouvoir être significatif qu'avec des temps de présentation des mots suffisamment longs (effet observé pour 66 ms de temps de présentation, pas pour 50 ms), et que pour une position optimale du regard dans le mot (proche du centre du mot). Les effets "Top-down" lexicaux facilitateurs permettent alors de renverser les effets "Bottom-up" de position de regard : une lettre en position centrale d'une séquence est difficilement identifiable si l'on ne tient compte que des effets "Bottom-up" de position de regard. L'ajout d'effets "Top-down" lexicaux rend, à l'inverse, cette position la plus favorable à l'identification de lettre.

Dans d'autres conditions expérimentales, nous avons observé que cet effet facilitateur n'était significatif qu'avec amorçage préalable du traitement lexical en mémoire de travail (du fait du traitement antérieur et du stockage en mémoire de travail d'une autre séquence de lettres).

Ces observations particulières peuvent expliquer pourquoi les effets lexicaux sont observés dans les différentes études publiées dans la littérature aussi bien 150 ms après stimulation (Proverbio et al., 2004; Sereno et al., 1998), que uniquement 500 ms après (Polich and Donchin, 1988).

Par ailleurs, nous observons dans l'étude des effets "Top-down" lexicaux que l'onde N1 est significativement plus ample lorsque les sujets voient des mots plutôt que des non-mots. Ainsi, l'influence "Top-down" du lexique mental faciliterait le traitement des lettres d'un mot, mais pas celles d'un non-mot. A l'inverse, dans l'étude sur les effets "Top-down" attentionnels, l'effet facilitateur de la pré-activation du lexique mental influence de la même manière le traitement des lettres d'un mot ou d'un pseudo-mot. Il semble donc que les effets "Top-down" lexicaux facilitent le traitement d'un mot, ou d'une séquence linguistique orthographiquement proche d'un mot. Ceci confirme l'idée que l'onde N1 reflète un traitement pré-lexical, permettant de différencier les mots des non-mots (Cornelissen et al., 2003; Salmelin et al., 1996), mais pas les mots des pseudo-mots proches orthographiquement (Fiebach et al., 2002; Pammer et al., 2004; Simon et al., 2004).

Effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant le stade de traitement des séquences de lettres.

L'étude des effets "Top-down" lexicaux nous a permis de mettre en évidence des influences significatives du temps de présentation des stimuli et du lexique mental sur le stade de traitement des séquences de lettres. Les contraintes expérimentales de l'étude sur les effets "Top-down" attentionnels ne nous permettent pas de définir les influences du soutien d'attention et de l'attention sélective sur ce stade de traitement : en effet, la négativité temporo-pariétale gauche – visible entre 180 et 250 ms après stimulation (Pammer et al., 2004; Proverbio et al., 2002a; Salmelin et al., 1996; Tarkiainen et al.,

1999) – n'est pas observée sur les tracés de potentiels obtenus dans cette étude (voir la figure 3 du chapitre 5). Il est probable que cette onde négative, spécifique au traitement des mots, soit confondue dans le 'bruit' de l'enregistrement, ou masquée par un autre évènement électrophysiologique.

Le fait que le lexique mental influence le stade de traitement des séquences de lettres est un résultat attendu, tout à fait congruent avec les différents modèles interactifs de la reconnaissance visuelle de mots isolés (McClelland and Rumelhart, 1981; Paap et al., 1982). Ce qui est plus étonnant est le fait même que l'on observe un évènement reflétant le traitement des mots, alors que les sujets avaient pour consigne de ne pas lire les mots mais uniquement de reconnaître une de leurs 5 lettres. Le débriefing de l'expérience confirme ce résultat puisque la majorité des sujets révélaient à la fin de l'expérience qu'ils avaient lu les mots 'involontairement'.

Ce résultat illustre parfaitement l'automatisme de la lecture. De nombreuses situations écologiques ainsi que de nombreuses études de psychologie expérimentale (effet Stroop par exemple ; voir entre autre (Brown et al., 2002)) révèlent que la lecture, une fois acquise par un lecteur expert, devient totalement automatique. Même si un sujet n'est pas sensé reconnaître ou lire un mot, il est difficile d'éviter tout traitement du stimulus (MacLeod, 1991; Price et al., 1996b).

Cette 'automatisme' de la lecture est telle qu'un lecteur expert est capable de lire un mot présenté brièvement et masqué, sans pouvoir rapporter sa casse ou sa police (Adams, 1979). Cette observation est confirmée par l'étude de cas d'un patient capable d'extraire une information verbale sans attention focalisée sur l'information visuelle (dissociation entre l'habilité à lire des lettres et à en percevoir la forme) (Suzuki and Yamadori, 2000).

Nous avons démontré jusque là que les stades de traitement des traits visuels et des lettres d'un mot sont automatiques, bien que dépendants de différents facteurs "Bottom-up" et "Top-down". De plus, le traitement des mots dans l'hémisphère cérébral gauche est réalisé même si la tâche ne nécessite pas explicitement un tel traitement. Il semble donc que les trois phases de traitement des séquences de lettres – décrites dans le modèle IAM – soient sollicitées pour toute présentation visuelle d'un stimulus linguistique, quelles que soient les conditions expérimentales et les demandes de la tâche.

Le paradigme utilisé pour étudier les effets "Top-down" attentionnels semble être un très bon outil pour tester l'automatisme des différents stades de traitement des séquences de lettres. Les conditions expérimentales dans lesquelles nous l'avons utilisé ne nous permettent pas d'étudier l'onde négative latéralisée à gauche (N_{Left}), et nous ne pouvons donc pas analyser l'automatisme de la phase de traitement des séquences de lettres et les facteurs attentionnels l'influencent. Une nouvelle étude – basée sur le même paradigme – pourrait permettre d'étudier ces phénomènes, en utilisant des mots et non-mots comme stimuli, et un délai plus grand entre deux items d'une même paire. En effet, nous supposons que les différences de traitement entre mots et non-mots entraîneront des variations électrophysiologiques plus importantes qu'entre mots et pseudo-mots, et que l'augmentation du délai permettra de moins 'bousculer' les phases

de traitement, et donc de pouvoir mieux délimiter et analyser la N_{Left} . Cette nouvelle étude permettrait d'étudier les effets attentionnels ayant une incidence sur le stade de traitement des séquences de lettres, et de juger de l'automatisme de ce processus.

Nous émettons l'hypothèse qu'un effet significatif de l'attention sélective sera observé sur l'onde N_{Left} , puisque cette attention sélective induira une pré-activation du lexique mental pour la catégorie cible 'Mot', pas pour la catégorie 'Non-mot'. De plus, au vu des résultats de l'étude sur les effets "Top-down" lexicaux, le traitement des séquences de lettres semble être automatique. Nous devrions donc observer une onde N_{Left} avec ou sans soutien d'attention.

Effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant le stade de catégorisation des séquences de lettres.

La catégorisation d'une séquence de lettres (en temps que mot ou non-mot) est significativement plus rapide si les stimuli sont présentés plus longtemps, quelle que soit leur catégorie lexicale.

Il est probable que l'influence du temps de présentation sur le temps de catégorisation se fasse par l'intermédiaire du lexique mental : en effet, un TP plus long entraîne des effets "Top-down" lexicaux facilitateurs plus importants (dès le stade de traitement des lettres). Ceci pourrait induire indirectement des temps de catégorisation plus courts pour des TP plus longs.

Par ailleurs, les non-mots sont catégorisés plus rapidement que les mots, quel que soit leur temps de présentation. Ceci peut s'expliquer par le fait que les non-mots sont des séquences de consonnes, et ils sont donc aisément identifiables comme des séquences lexicalement non valides.

L'attention sélective portée sur la catégorie 'Mot' ou 'Pseudo-mot' n'influence pas directement le temps de catégorisation. Ceci est probablement dû au fait que ces deux catégories linguistiques, très proches orthographiquement, induisent toutes deux une pré-activation du lexique mental.

L'attention sélective a toutefois une influence importante sur le temps de catégorisation, par l'intermédiaire de l'effet de congruence : un stimulus congruent avec la catégorie cible est catégorisé significativement plus vite que s'il est incongruent.

Effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant la charge attentionnelle allouée au traitement des séquences de lettres.

La quantité de ressource attentionnelle allouée au traitement d'une séquence de lettres est diminuée si le temps de présentation de cette séquence est augmenté (quelle que soit sa catégorie linguistique). De même que pour le temps de catégorisation, cette observation est probablement la conséquence indirecte des effets "Top-down" lexicaux facilitateurs : si le TP est augmenté, les phases de traitement des lettres et des séquences sont facilitées par effet "Top-down" du lexique mental, et la charge

attentionnelle nécessaire à la catégorisation est de ce fait moins importante.

Selon cette hypothèse, la pré-activation du lexique mental aurait une influence indirecte sur la charge attentionnelle : celle-ci serait diminuée dans des conditions expérimentales (TP plus long par exemple) favorables à une forte influence du lexique mental sur les phases de traitement des lettres et des séquences de lettres. A l'inverse, aucune influence directe du lexique mental sur la charge attentionnelle n'est observée : quelle que soit l'influence du lexique mental sur les différentes phases de traitement des mots et des non-mots, la charge attentionnelle nécessaire à leur catégorisation est identique.

L'attention sélective portée sur une catégorie cible et la congruence du stimulus avec cette catégorie peuvent influencer la charge attentionnelle. Cette influence est fortement dépendante de la tâche : la charge attentionnelle est maximale lorsqu'un lecteur doit stocker un mot en mémoire de travail dans l'attente du traitement d'un second stimulus linguistique. Dans cette condition particulière de tâche expérimentale, la charge attentionnelle serait donc plutôt augmentée du fait du travail mnésique que le sujet est amené à réaliser. Ceci est confirmé par le fait qu'en condition expérimentale où le sujet n'a pas à stocker d'information en mémoire de travail, les facteurs d'attention sélective et de congruence n'ont plus d'incidence sur la charge attentionnelle (voir les effets d'attention sélective et de congruence après présentation du second item d'une paire, dans l'étude des effets "Top-down" attentionnels ; chapitre 5).

Traitement de séquences de lettres et effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant ce traitement, chez des adultes dyslexiques.

Les deux études testant les effets "Top-down" lexicaux et attentionnels chez les sujets dyslexiques (voir chapitre 6) nous ont permis de mettre en évidence un certain nombre de déficits chez ces patients souffrant de troubles de la lecture :

Les sujets dyslexiques ne diffèrent pas des sujets normo-lecteurs pour ce qui est de la phase de traitement des traits visuels et des différents effets "Top-down" et "Bottom-up" influençant cette phase.

A l'inverse, les phases de traitement des lettres et des séquences de lettres sont déficitaires chez ces mêmes sujets.

Le temps de catégorisation et la charge attentionnelle allouée à cette catégorisation ne diffèrent pas entre sujets témoins et dyslexiques lorsqu'ils ont à discriminer des mots et des non-mots. Par contre, cette catégorisation est déficiente chez les sujets dyslexiques pour une discrimination entre mots et pseudo-mots. Les sujets dyslexiques semblent souffrir d'un déficit de traitement des mots, ce qui entraîne d'importantes difficultés à définir si un pseudo-mot – proche orthographiquement d'un mot – est un mot réel de la langue ou non. Par contre, bien que le traitement des mots soit déficitaire chez ces patients, ils n'ont pas de difficulté majeure pour décider que la séquence 'XDQMP', par exemple, n'est pas un mot de la langue française.

Les effets de type "Bottom-up" de temps de présentation et de position de regard

sont identiques pour les deux groupes de sujets : les différents effets facilitateurs d'un temps de présentation augmenté sont observés chez les dyslexiques autant que chez les sujets contrôles. De plus, le masquage latéral des lettres centrales d'une séquence, ainsi que le transfert interhémisphérique d'information pour les positions de regard extrêmes semblent être identiques chez les sujets témoins et dyslexiques.

Les effets "Top-down" lexicaux sur les stades de traitement des lettres et des séquences de lettres sont déficitaires chez les sujets dyslexiques. Nous ne pouvons définir si cette déficience est due (1) à un stockage d'information dans le lexique mental défectueux ; (2) à un déficit du 'retour' de l'information stockée, au moment du traitement d'un mot précédemment encodé ; (3) ou directement au déficit des phases de traitement des lettres et des séquences de lettres.

Les deux observations précédentes nous permettent d'affiner l'hypothèse faite sur les effets directs ou indirects du TP : les effets significatifs du TP sur la charge attentionnelle et le temps de catégorisation – observés chez les sujets témoins – ne sont pas uniquement conséquents à l'effet de ce même TP sur le lexique mental. En effet, les influences "Top-down" du lexique mental sont déficitaires chez les sujets dyslexiques alors que les influences "Bottom-up" du TP sont identiques à celles des sujets témoins. Ces influences "Bottom-up" semblent donc être directes, et non pas résulter d'une influence lexicale indirecte.

Enfin, les sujets dyslexiques testés dans nos deux études ne semblent pas souffrir de troubles de l'attention sélective. Par contre, les effets de congruence entre la catégorie cible et le stimulus sont déficitaires. Cette observation est probablement une conséquence directe du déficit dans la phase de traitement des séquences de lettres – puisque l'attention sélective semble épargnée. Un défaut de traitement des séquences de lettres ne permettrait pas aux sujets dyslexiques d'évaluer la congruence de ces séquences de lettres avec une catégorie linguistique définie.

Nous avons vu dans l'introduction de ce manuscrit que les patients dyslexiques semblent souffrir d'un déficit global d'automatisation des processus cognitifs et de fonctionnement de la mémoire de travail (Demonet et al., 2004; Ramus et al., 2003) (voir le paragraphe D.5.g du chapitre 1). Ce travail est en accord avec cette hypothèse puisque nous avons mis en évidence des déficits significatifs, chez les sujets dyslexiques, dans la réalisation des différentes étapes de traitement des séquences de lettres. Les stades de traitement des lettres et des séquences de lettres semblent ne pas être automatisés chez les sujets dyslexiques comme ils le sont chez les sujets normo-lecteurs. Par ailleurs, l'étude des effets "Top-down" attentionnels révèle que les sujets dyslexiques souffrent de troubles importants de la mémoire de travail.

Mais le trouble dyslexique ne peut s'expliquer uniquement par un déficit de stockage en mémoire de travail, puisque les patients testés dans nos études diffèrent significativement des sujets contrôles dans une tâche qui s'affranchit de tout effet de la mémoire de travail (tâche de discrimination à choix alternatif forcé). Nous proposons donc qu'aux déficits d'automatisation des processus cognitifs et de stockage en mémoire de travail soit ajouté un facteur non négligeable qui est le trouble de stockage ou de récupération d'information dans le lexique mental.

Cette dernière hypothèse est en accord avec les prédictions faites sur le syndrome dyslexique, à partir du modèle multi-traces de Ans et al. (Ans et al., 1998) (voir le paragraphe C.3.c du chapitre 1 pour la description de ce modèle). Si l'on se base sur ce modèle de lecture, un déficit visuo-attentionnel pourrait induire une dyslexie de surface, puisqu'une réduction de la fenêtre visuo-attentionnelle entraînerait un déficit de stockage de mots dans le lexique mental (Valdois et al., 2004).

B. Perspectives

Les différentes études de la lecture présentées dans ce manuscrit nous ont permis de mettre en évidence l'importance des conditions expérimentales dans l'analyse de résultats d'électrophysiologie :

Le temps de présentation des stimuli langagiers peut induire des variations significatives de résultats, même dans le cas où il passe uniquement de 50 à 66 ms.

Les stimuli langagiers servant de 'contrôles' dans les études de reconnaissance visuelle de mots isolés influencent significativement les résultats : que les mots soient présentés alternativement avec des pseudo-mots ou des non-mots fait que les traitements spécifiques des mots ne sont pas nécessairement observables sur les tracés électrophysiologiques. Il en est de même pour les résultats d'imagerie cérébrale, où le choix de la condition contrôle utilisée dans la méthode soustractive est capital. Des études de psychologie expérimentale ont aussi mis en avant l'importance du choix des catégories de stimuli. En effet, des pseudo-mots présentés alternativement avec des mots ne sont pas traités de la même manière par les sujets que s'ils sont présentés avec des non-mots : par exemple, l'effet de la position du regard est obtenu pour des pseudo-mots présentés en alternance avec des mots, mais pas pour les mêmes pseudo-mots présentés en alternance avec des non-mots (Nazir, T.A. données non publiées).

Paradoxalement, il semble que la consigne même de la tâche ait une incidence moins importante que le temps de présentation ou que les stimuli 'contrôles'. Les deux études que nous avons réalisées – bien que basées sur des paradigmes très différents – montrent toutes deux que les différentes phases de traitement d'un mot, du traitement des traits visuels à la catégorisation, sont mises en place lors de la présentation visuelle des stimuli, que la tâche soit une décision lexicale, une vision passive ou une identification de lettre.

La principale perspective de ce travail de recherche serait donc de reproduire les deux études présentées, en faisant varier les conditions expérimentales.

L'étude des effets "Top-down" lexicaux pourrait être testée – grâce au paradigme de Reicher-Wheeler – en utilisant des stimuli langagiers présentés verticalement ou horizontalement, afin de définir si les influences lexicales peuvent être de type "Bottom-up".

L'étude des effets "Top-down" attentionnels – basée sur le paradigme Hold/Release – pourrait être reproduite en utilisant des mots et des non-mots, afin de tester les effets de

l'attention sélective sur l'onde N_{Left} , et de juger de l'automatisme de la phase de traitement des séquences de lettres, avec ou sans soutien d'attention.

L'étude des effets "Top-down" attentionnels chez les sujets dyslexiques pourrait être reproduite avec des conditions expérimentales moins 'complexes' (discrimination de mots *versus* non-mots, délai entre deux stimuli d'une paire augmenté...), afin d'obtenir des tracés de PE moins 'bruités', et donc de pouvoir étudier les différentes phases de traitement reflétées par les ondes P1, N1 et N_{Left} .

Enfin, le paradigme de Reicher-Wheeler semble être un outil intéressant pour tester le déroulement temporel des effets "Top-down" lexicaux. Utiliser ce paradigme en faisant varier différents facteurs expérimentaux permettrait de définir la dépendance des effets "Top-down" lexicaux à ces différentes variables manipulées.

Le paradigme de Hold/Release est un outil permettant entre autre de tester l'automatisme de différents traitements linguistiques, en fonction du soutien ou du relâchement de l'attention du sujet. Ce paradigme pourrait permettre à l'avenir de tester l'automatisme de différents processus cognitifs autres que le traitement de mots isolés présentés en modalité visuelle.

Bibliographie

- Abdullaev YG, Bechtereva NP. Neuronal correlate of the higher-order semantic code in human prefrontal cortex in language tasks. *Int J Psychophysiol* 1993; 14: 167-77.
- Abdullaev YG, Posner MI. Event-related brain potential imaging of semantic encoding during processing single words. *Neuroimage* 1998; 7: 1-13.
- Adams MJ. Models of word recognition. *Cogn Psychol* 1979; 11: 133-76.
- Adlard A, Hazan V. Speech perception in children with specific reading difficulties (dyslexia). *Q J Exp Psychol A* 1998; 51: 153-77.
- Alexander MP, Hiltbrunner B, Fischer RS. Distributed anatomy of transcortical sensory aphasia. *Arch Neurol* 1989; 46: 885-92.
- Ans B, Carbonnel S, Valdois S. A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychol Rev* 1998; 105: 678-723.
- Anstis SM. Letter: A chart demonstrating variations in acuity with retinal position. *Vision Res* 1974; 14: 589-92.
- Arroyo S, Lesser RP, Poon WT, Webber WR, Gordon B. Neuronal generators of visual evoked potentials in humans: visual processing in the human cortex. *Epilepsia* 1997; 38: 600-10.
- Aylward EH, Richards TL, Berninger VW, Nagy WE, Field KM, Grimme AC, et al. Instructional treatment associated with changes in brain activation in children with dyslexia. *Neurology* 2003; 61: 212-9.
- Baddeley A. *Working Memory*. Oxford: Oxford University Press, 1986.

- Baddeley A. Working memory and language: an overview. *J Commun Disord* 2003; 36: 189-208.
- Bakker DJ, Bouma A, Gardien CJ. Hemisphere-specific treatment of dyslexia subtypes: a field experiment. *J Learn Disabil* 1990; 23: 433-8.
- Balota DA. The role of meaning in word recognition. In: Balota DA, Flores d'Arcais GB and Rayner K, editors. *Comprehension processing in reading*. Hillsdale: Erlbaum, 1990: 9-32.
- Balota DA. Visual word recognition: The journey from features to meaning. In: Gernsbacher MA, editor. *Handbook of Psycholinguistics*. New York: Academic Press, 1994: 303-358.
- Barde LH, Thompson-Schill SL. Models of functional organization of the lateral prefrontal cortex in verbal working memory: evidence in favor of the process model. *J Cogn Neurosci* 2002; 14: 1054-63.
- Basser PJ, Mattiello J, LeBihan D. MR diffusion tensor spectroscopy and imaging. *Biophys J* 1994; 66: 259-67.
- Bavelier D, Corina D, Jezard P, Padmanabhan S, Prinster A, Braun A. Sentence reading: a functional MRI study at 4 tesla. *J Cogn Neurosci* 1997; 9: 664-686.
- Bayard S, Gosselin N, Robert M, Lassonde M. Inter- and intra-hemispheric processing of visual event-related potentials in the absence of the corpus callosum. *J Cogn Neurosci* 2004; 16: 401-14.
- Beauregard M, Chertkow H, Bub D, Murtha S, Dixon R, Evans AC. The neural substrate for concrete, abstract, and emotional word lexica: a positron emission tomography study. *J Cogn Neurosci* 1997; 9: 441-461.
- Beauvois MF, Derouesne J. Phonological alexia: three dissociations. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1979; 42: 1115-24.
- Bednarek DB, Saldana D, Quintero-Gallego E, Garcia I, Grabowska A, Gomez CM. Attentional deficit in dyslexia: a general or specific impairment? *Neuroreport* 2004; 15: 1787-90.
- Behrmann M, Geng JJ, Shomstein S. Parietal cortex and attention. *Curr Opin Neurobiol* 2004; 14: 212-7.
- Belin P, Zatorre RJ, Lafaille P, Ahad P, Pike B. Voice-selective areas in human auditory cortex. *Nature* 2000; 403: 309-12.
- Bentin S, Mouchetant-Rostaing Y, Giard MH, Echallier JF, Pernier J. ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: time course and scalp distribution. *J Cogn Neurosci* 1999; 11: 235-60.
- Besner D, Twilley L, McCann RS, Seergobin K. On the association between connectionism and data: Are a few words necessary? *Psychol Rev* 1990; 97: 432-446.
- Binder JR, Frost JA, Hammeke TA, Bellgowan PS, Springer JA, Kaufman JN, et al. Human temporal lobe activation by speech and nonspeech sounds. *Cereb Cortex* 2000; 10: 512-28.
- Binder JR, McKiernan KA, Parsons ME, Westbury CF, Possing ET, Kaufman JN, et al. Neural correlates of lexical access during visual word recognition. *J Cogn Neurosci*

- 2003; 15: 372-93.
- Bischoff-Grethe A, Proper SM, Mao H, Daniels KA, Berns GS. Conscious and unconscious processing of nonverbal predictability in Wernicke's area. *J Neurosci* 2000; 20: 1975-81.
- Boder E. Developmental dyslexia: a diagnostic approach based on three atypical reading-spelling patterns. *Dev Med Child Neurol* 1973; 15: 663-87.
- Bonmassar G, Schwartz DP, Liu AK, Kwong KK, Dale AM, Belliveau JW. Spatiotemporal brain imaging of visual-evoked activity using interleaved EEG and fMRI recordings. *Neuroimage* 2001; 13: 1035-43.
- Bookheimer S. Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annu Rev Neurosci* 2002; 25: 151-88.
- Bookheimer S, Zeffiro TA, Blaxton T, Gaillard W, Theodore W. Regional cerebral blood flow during object naming and word reading. *Hum Brain Mapp* 1995; 3: 93-106.
- Booth JR, Burman DD, Meyer JR, Gitelman DR, Parrish TB, Mesulam MM. Modality independence of word comprehension. *Hum Brain Mapp* 2002; 16: 251-61.
- Bottini G, Corcoran R, Sterzi R, Paulesu E, Schenone P, Scarpa P, et al. The role of the right hemisphere in the interpretation of figurative aspects of language. A positron emission tomography activation study. *Brain* 1994; 117 (Pt 6): 1241-53.
- Bouma H. Visual interference in the parafoveal recognition of initial and final letters of words. *Vision Res* 1973; 13: 767-82.
- Bradlow AR, Kraus N, Nicol TG, McGee TJ, Cunningham J, Zecker SG, et al. Effects of lengthened formant transition duration on discrimination and neural representation of synthetic CV syllables by normal and learning-disabled children. *J Acoust Soc Am* 1999; 106: 2086-96.
- Brambati SM, Termine C, Ruffino M, Stella G, Fazio F, Cappa SF, et al. Regional reductions of gray matter volume in familial dyslexia. *Neurology* 2004; 63: 742-5.
- Breznitz Z, Leikin M. Syntactic processing of Hebrew sentences in normal and dyslexic readers: electrophysiological evidence. *J Genet Psychol* 2000; 161: 359-80.
- Broca P. Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé; suivies d'une observation d'aphemie. *Bulletin de la société anatomique de Paris* 1861; 6: 330-357.
- Brown TL, Joneleit K, Robinson CS, Brown CR. Automaticity in reading and the Stroop task: testing the limits of involuntary word processing. *Am J Psychol* 2002; 115: 515-43.
- Brown WS, Bjerke MD, Galbraith GC. Interhemispheric transfer in normals and acausals: latency adjusted evoked potential averaging. *Cortex* 1998; 34: 677-92.
- Brunswick N, McCrory E, Price CJ, Frith CD, Frith U. Explicit and implicit processing of words and pseudowords by adult developmental dyslexics: A search for Wernicke's Wortschatz? *Brain* 1999; 122 (Pt 10): 1901-17.
- Bryden MP, McManus IC, Bulman-Fleming MB. Evaluating the empirical support for the Geschwind-Behan-Galaburda model of cerebral lateralization. *Brain Cogn* 1994; 26: 103-67.
- Brysbart M. Behavioral estimates of interhemispheric transmission time and the signal

- detection method: a reappraisal. *Percept Psychophys* 1994; 56: 479-90.
- Brysbaert M. The importance of interhemispheric transfer for foveal vision: a factor that has been overlooked in theories of visual word recognition and object perception. *Brain Lang* 2004; 88: 259-67.
- Brysbaert M, Vitu F, Schroyens W. The right visual field advantage and the optimal viewing position effect: On the relation between foveal and parafoveal word recognition. *Neuropsychology* 1996; 10: 385-395.
- Buchel C, Price C, Friston K. A multimodal language region in the ventral visual pathway. *Nature* 1998; 394: 274-7.
- Bullier J. Integrated model of visual processing. *Brain Res Brain Res Rev* 2001; 36: 96-107.
- Caplan D, Alpert NM, Waters G, Olivieri A. Activation of Broca's area by syntactic processing under conditions of concurrent articulation. *Hum Brain Mapp* 2000; 9: 65-71.
- Cappa S, Cavallotti G, Vignolo LA. Phonemic and lexical errors in fluent aphasia: correlation with lesion site. *Neuropsychologia* 1981; 19: 171-7.
- Caramazza A, Hillis AE. Spatial representation of words in the brain implied by studies of a unilateral neglect patient. *Nature* 1990; 346: 267-9.
- Castles A, Coltheart M. Varieties of developmental dyslexia. *Cognition* 1993; 47: 149-80.
- Castles A, Datta H, Gayan J, Olson RK. Varieties of developmental reading disorder: genetic and environmental influences. *J Exp Child Psychol* 1999; 72: 73-94.
- Catani M, Jones DK, Donato R, Ffytche DH. Occipito-temporal connections in the human brain. *Brain* 2003; 126: 2093-107.
- Catani M, Jones DK, ffytche DH. Perisylvian language networks of the human brain. *Ann Neurol* 2005; 57: 8-16.
- Cattell JM. The time it takes to see and name objects. *Mind* 1886; 11: 53-65.
- Celsis P, Boulanouar K, Doyon B, Ranjeva JP, Berry I, Nespoulous JL, et al. Differential fMRI responses in the left posterior superior temporal gyrus and left supramarginal gyrus to habituation and change detection in syllables and tones. *Neuroimage* 1999; 9: 135-44.
- Chase CH, Tallal P. A developmental, interactive activation model of the word superiority effect. *J Exp Child Psychol* 1990; 49: 448-87.
- Chomsky N. *Structures syntaxiques*. Paris: Seuil, 1957.
- Chomsky N. *Aspects de la théorie syntaxique*. Paris: Seuil, 1965.
- Ciesielski K. Event-related potentials in children with specific visual cognitive disability. *Neuropsychologia* 1989; 27: 303-313.
- Clark JJ, O'Regan JK. Word ambiguity and the optimal viewing position in reading. *Vision Res* 1999; 39: 843-857.
- Cohen L, Dehaene S. Specialization within the ventral stream: the case for the visual word form area. *Neuroimage* 2004; 22: 466-76.
- Cohen L, Dehaene S, Naccache L, Lehericy S, Dehaene-Lambertz G, Henaff MA, et al.

- The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain* 2000; 123 (Pt 2): 291-307.
- Cohen L, Jobert A, Le Bihan D, Dehaene S. Distinct unimodal and multimodal regions for word processing in the left temporal cortex. *Neuroimage* 2004; 23: 1256-70.
- Cohen L, Lehericy S, Chochon F, Lemer C, Rivaud S, Dehaene S. Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain* 2002; 125: 1054-69.
- Cohen L, Martinaud O, Lemer C, Lehericy S, Samson Y, Obadia M, et al. Visual word recognition in the left and right hemispheres: anatomical and functional correlates of peripheral alexias. *Cereb Cortex* 2003; 13: 1313-33.
- Cohen M, Campbell R, Yaghmai F. Neuropathological abnormalities in developmental dysphasia. *Ann Neurol* 1989; 25: 567-70.
- Coltheart M. Lexical access in simple reading tasks. In: Underwood G, editor. *Strategies of information processing*. London: Academic Press, 1978: 151-216.
- Coltheart M, Curtis B, Atkins P, Haller M. Models of reading aloud: Dual-route and parallel-distributed-processing approaches. *Psychological Review* 1993; 100: 589-608.
- Coltheart M, Rastle K, Perry C, Langdon R, Ziegler J. DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychol Rev* 2001; 108: 204-56.
- Comerchero MD, Polich J. P3a, perceptual distinctiveness, and stimulus modality. *Brain Res Cogn Brain Res* 1998; 7: 41-8.
- Connolly JF, Phillips NA. Event-related potential components reflect phonological and semantic processing of the terminal word spoken sentences. *J Cogn Neurosci* 1994; 6: 256-266.
- Content AM, P. Radeau, M. BRULEX : une base de données lexicales informatisée pour le français écrit et parlé. *L'Année Psychologique* 1990; 90: 551.
- Corbetta M, Akbudak E, Conturo TE, Snyder AZ, Ollinger JM, Drury HA, et al. A common network of functional areas for attention and eye movements. *Neuron* 1998; 21: 761-73.
- Corbetta M, Miezin FM, Dobmeyer S, Shulman GL, Petersen SE. Attentional modulation of neural processing of shape, color, and velocity in humans. *Science* 1990; 248: 1556-9.
- Corbetta M, Miezin FM, Dobmeyer S, Shulman GL, Petersen SE. Selective and divided attention during visual discriminations of shape, color, and speed: functional anatomy by positron emission tomography. *J Neurosci* 1991; 11: 2383-402.
- Corbetta M, Miezin FM, Shulman GL, Petersen SE. A PET study of visuospatial attention. *J Neurosci* 1993; 13: 1202-26.
- Cornelissen P, Tarkiainen A, Helenius P, Salmelin R. Cortical effects of shifting letter position in letter strings of varying length. *J Cogn Neurosci* 2003; 15: 731-46.
- Cornelissen PL, Hansen PC, Hutton JL, Evangelinou V, Stein JF. Magnocellular visual function and children's single word reading. *Vision Res* 1998; 38: 471-82.

- Coull JT, Nobre AC. Where and when to pay attention: the neural systems for directing attention to spatial locations and to time intervals as revealed by both PET and fMRI. *J Neurosci* 1998; 18: 7426-35.
- Croft RJ, Gonsalvez CJ, Gabriel C, Barry RJ. Target-to-target interval versus probability effects on P300 in one- and two-tone tasks. *Psychophysiology* 2003; 40: 322-8.
- Cutler A, Mehler J, Norris D, Segui J. The syllable's differing role in the segmentation of French and English. *Journal of Memory and Language* 1986; 25: 385-400.
- Damasio AR, Damasio H. The anatomic basis of pure alexia. *Neurology* 1983; 33: 1573-83.
- Damasio AR, Geschwind N. The neural basis of language. *Annu Rev Neurosci* 1984; 7: 127-47.
- Damasio H, Grabowski TJ, Tranel D, Hichwa RD, Damasio AR. A neural basis for lexical retrieval. *Nature* 1996; 380: 499-505.
- Dapretto M, Bookheimer SY. Form and content: dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron* 1999; 24: 427-32.
- Davidson RJ, Leslie SC, Saron C. Reaction time measures of interhemispheric transfer time in reading disabled and normal children. *Neuropsychologia* 1990; 28: 471-85.
- de Groot AMB. La représentation lexico-sémantique et l'accès lexical chez le bilingue. *Psychologie Française* 1998; 43: 297-312.
- DeFries JC, Fulker DW, LaBuda MC. Evidence for a genetic aetiology in reading disability of twins. *Nature* 1987; 329: 537-9.
- Dehaene S, Le Clec HG, Poline JB, Le Bihan D, Cohen L. The visual word form area: a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport* 2002; 13: 321-5.
- Dehaene S, Naccache L, Cohen L, Bihan DL, Mangin JF, Poline JB, et al. Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nat Neurosci* 2001; 4: 752-8.
- Dejerine J. Sur un cas de cécité verbale avec agraphie, suivi d'autopsie. *Mémoires de la Société Biologique* 1891; 3: 197-201.
- Dejerine J. Contribution à l'étude anatomoclinique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Compte-rendu hebdomadaire des séances et mémoires de la Société de Biologie* 1892; 4: 61-90.
- Dell GS. A spreading-activation theory of retrieval in sentence production. *Psychol Rev* 1986; 93: 283-321.
- Demonet JF, Chollet F, Ramsay S, Cardebat D, Nespoulous JL, Wise R, et al. The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain* 1992; 115 (Pt 6): 1753-68.
- Demonet JF, Price C, Wise R, Frackowiak RS. Differential activation of right and left posterior sylvian regions by semantic and phonological tasks: a positron-emission tomography study in normal human subjects. *Neurosci Lett* 1994; 182: 25-8.
- Demonet JF, Taylor MJ, Chaix Y. Developmental dyslexia. *Lancet* 2004; 363: 1451-60.
- Demonet JF, Thierry G, Cardebat D. Renewal of the neurophysiology of language:

- functional neuroimaging. *Physiol Rev* 2005; 85: 49-95.
- Derouesne J, Beauvois MF. Phonological processing in reading: data from alexia. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1979; 42: 1125-32.
- D'Esposito M, Detre JA, Aguirre GK, Stallcup M, Alsop DC, Tippet LJ, et al. A functional MRI study of mental image generation. *Neuropsychologia* 1997; 35: 725-30.
- Devlin JT, Jamison HL, Matthews PM, Gonnerman LM. Morphology and the internal structure of words. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2004; 101: 14984-8.
- Devlin JT, Matthews PM, Rushworth MF. Semantic processing in the left inferior prefrontal cortex: a combined functional magnetic resonance imaging and transcranial magnetic stimulation study. *J Cogn Neurosci* 2003; 15: 71-84.
- Dewey D. What is developmental dyspraxia? *Brain Cogn* 1995; 29: 254-74.
- Dolan RJ, Fink GR, Rolls E, Booth M, Holmes A, Frackowiak RS, et al. How the brain learns to see objects and faces in an impoverished context. *Nature* 1997; 389: 596-9.
- Donchin E, Miller GA, Farwell LA. The endogenous components of the event-related potential--a diagnostic tool? *Prog Brain Res* 1986; 70: 87-102.
- Drake WE. Clinical and pathological findings in a child with a developmental learning disability. *J Learn Disabil* 1968; 1: 486-502.
- Driver J, Baylis GC, Rafal RD. Preserved figure-ground segregation and symmetry perception in visual neglect. *Nature* 1992; 360: 73-5.
- Duncan CC, Rumsey JM, Wilkniss SM, Denckla MB, Hamburger SD, Odou-Potkin M. Developmental dyslexia and attention dysfunction in adults: brain potential indices of information processing. *Psychophysiology* 1994; 31: 386-401.
- Eason RG. Effects of attention and arousal on visually evoked cortical potentials and reaction time in man. *Physiol Behav* 1969; 4: 283-289.
- Eckert M. Neuroanatomical markers for dyslexia: a review of dyslexia structural imaging studies. *Neuroscientist* 2004; 10: 362-71.
- Eckert MA, Leonard CM, Richards TL, Aylward EH, Thomson J, Berninger VW. Anatomical correlates of dyslexia: frontal and cerebellar findings. *Brain* 2003; 126: 482-94.
- Eden GF, VanMeter JW, Rumsey JM, Maisog JM, Woods RP, Zeffiro TA. Abnormal processing of visual motion in dyslexia revealed by functional brain imaging. *Nature* 1996a; 382: 66-9.
- Eden GF, VanMeter JW, Rumsey JM, Zeffiro TA. The visual deficit theory of developmental dyslexia. *Neuroimage* 1996b; 4: S108-17.
- Eden GF, Zeffiro TA. Neural systems affected in developmental dyslexia revealed by functional neuroimaging. *Neuron* 1998; 21: 279-82.
- Ellis AW. *Reading, writing and dyslexia: A cognitive analysis*. London: Erlbaum, L., 1984.
- Escera C, Alho K, Winkler I, Naatanen R. Neural mechanisms of involuntary attention to acoustic novelty and change. *J Cogn Neurosci* 1998; 10: 590-604.
- Evrard P, Miladi N, Bonnier C, Gressens P. Normal and abnormal development of the brain. In: Rapin I and Segalowitz S, editors. *Child Neuropsychology*. Amsterdam:

- Elsevier Science B.V., 1992: 11-44.
- Facoetti A, Lorusso ML, Paganoni P, Cattaneo C, Galli R, Umiltà C, et al. Auditory and visual automatic attention deficits in developmental dyslexia. *Brain Res Cogn Brain Res* 2003; 16: 185-91.
- Facoetti A, Paganoni P, Turatto M, Marzola V, Mascetti GG. Visual-spatial attention in developmental dyslexia. *Cortex* 2000; 36: 109-23.
- Fagerheim T, Raeymaekers P, Tonnessen FE, Pedersen M, Tranebjaerg L, Lubs HA. A new gene (DYX3) for dyslexia is located on chromosome 2. *J Med Genet* 1999; 36: 664-9.
- Farah MJ, McClelland JL. A computational model of semantic memory impairment: modality specificity and emergent category specificity. *J Exp Psychol Gen* 1991; 120: 339-57.
- Farid M, Grainger J. How initial fixation position influences visual word recognition: a comparison of French and Arabic. *Brain Lang* 1996; 53: 351-68.
- Faust M, Kravetz S, Babkoff H. Hemispheric specialization or reading habits: evidence from lexical decision research with Hebrew words and sentences. *Brain Lang* 1993; 44: 254-63.
- Fiebach CJ, Friederici AD, Müller K, von Cramon DY. fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *J Cogn Neurosci* 2002; 14: 11-23.
- Fiez JA. Phonology, semantics, and the role of the left inferior prefrontal cortex. *Hum Brain Mapp* 1997; 5: 79-83.
- Fiez JA, Balota DA, Raichle ME, Petersen SE. Effects of lexicality, frequency, and spelling-to-sound consistency on the functional anatomy of reading. *Neuron* 1999; 24: 205-18.
- Fiez JA, Petersen SE. Neuroimaging studies of word reading. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1998; 95: 914-21.
- Fine EM. Does meaning matter? The impact of word knowledge on lateral masking. *Optom Vis Sci* 2001; 78: 831-8.
- Fink GR, Halligan PW, Marshall JC, Frith CD, Frackowiak RS, Dolan RJ. Where in the brain does visual attention select the forest and the trees? *Nature* 1996; 382: 626-8.
- Fisher SE, DeFries JC. Developmental dyslexia: genetic dissection of a complex cognitive trait. *Nat Rev Neurosci* 2002; 3: 767-80.
- Fisher SE, Marlow AJ, Lamb J, Maestrini E, Williams DF, Richardson AJ, et al. A quantitative-trait locus on chromosome 6p influences different aspects of developmental dyslexia. *Am J Hum Genet* 1999; 64: 146-56.
- Fitch WT, Hauser MD. Computational constraints on syntactic processing in a nonhuman primate. *Science* 2004; 303: 377-80.
- Fletcher CM, Prior MR. The rule learning behavior of reading disabled and normal children as a function of task characteristics and instruction. *J Exp Child Psychol* 1990; 50: 39-58.
- Fletcher PC, Happe F, Frith U, Baker SC, Dolan RJ, Frackowiak RS, et al. Other minds in the brain: a functional imaging study of "theory of mind" in story comprehension.

- Cognition 1995; 57: 109-28.
- Flint J. The genetic basis of cognition. *Brain* 1999; 122 (Pt 11): 2015-32.
- Fodor JA. *The modularity of mind*. Cambridge, 1983.
- Forster KI. Accessing the mental lexicon. In: Wales RJ and Walker E, editors. *New approaches to language mechanisms*. Amsterdam, North-Holland, 1976: 257-287.
- Forster KI. Levels of processing and the structure of the language processor. In: Cooper WE and Walker ECT, editors. *Sentence processing: psycholinguistic studies presented to Merrill Garrett*. Hillsdale: Erlbaum, L., 1979: 27-85.
- Forster KI. Basic issues in lexical processing. In: Marslen-Wilson W, editor. *Lexical Representation and Process*. Cambridge: MIT Press, 1989: 75-107.
- Forster KI, Davis C, Schoknecht C, Carter R. Masked priming with graphemically related forms : Repetition or partial activation? *Q. J. Exp. Psych.* 1987; 39: 211-251.
- Fosker T, Thierry G. Phonological oddballs in the focus of attention elicit a normal P3b in dyslexic adults. *Brain Res Cogn Brain Res* 2005; 24: 467-75.
- Francis WS. Cognitive integration of language and memory in bilinguals: Semantic representation. *Psychological Bulletin* 1999; 125: 193-222.
- Friederici AD. Event-related brain potential studies in language. *Curr Neurol Neurosci Rep* 2004; 4: 466-70.
- Friederici AD, Pfeifer E, Hahne A. Event-related brain potentials during natural speech processing: effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Brain Res Cogn Brain Res* 1993; 1: 183-92.
- Friederici AD, Ruschemeyer SA, Hahne A, Fiebach CJ. The role of left inferior frontal and superior temporal cortex in sentence comprehension: localizing syntactic and semantic processes. *Cereb Cortex* 2003; 13: 170-7.
- Frith C. Brain, mind and behaviour in dyslexia. In: Hulme C and Snowling M, editors. *Dyslexia: Biology, cognition and intervention*. London: Whurr Publishers, 1997: 1-19.
- Frith C, Dolan RJ. Brain mechanisms associated with top-down processes in perception. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 1997; 352: 1221-30.
- Frith U. Beneath the surface of developmental dyslexia. In: Patterson K, Marshall JC and Coltheart M, editors. *Surface dyslexia: Neuropsychological and cognitive studies of phonological reading*. London: Erlbaum, 1985: 301-330.
- Gabrieli JD, Poldrack RA, Desmond JE. The role of left prefrontal cortex in language and memory. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1998; 95: 906-13.
- Galaburda AM, Menard MT, Rosen GD. Evidence for aberrant auditory anatomy in developmental dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1994; 91: 8010-3.
- Galaburda AM, Rosen GD, Sherman GF. Individual variability in cortical organization: its relationship to brain laterality and implications to function. *Neuropsychologia* 1990; 28: 529-546.
- Galaburda AM, Sherman GF, Rosen GD, Aboitiz F, Geschwind N. Developmental dyslexia: four consecutive patients with cortical anomalies. *Ann Neurol* 1985; 18: 222-33.
- Garrett AS, Flowers DL, Absher JR, Fahey FH, Gage HD, Keyes JW, et al. Cortical

- activity related to accuracy of letter recognition. *Neuroimage* 2000; 11: 111-23.
- Garrett MF. A perspective on research in language production. In: Mehler J, Walker E and Garrett MF, editors. *Perspectives on mental representation*. Hillsdale, 1982.
- Gaskell MG, Marslen-Wilson W. Integrating form and meaning: A distributed model of speech perception. *Language and Cognitive Processes* 1997; 12: 613-656.
- Gaskell MG, Marslen-Wilson W. Ambiguity, competition, and blending in spoken word recognition. *Cognitive Science* 1999; 23: 439-462.
- Gaskell MG, Marslen-Wilson WD. Representation and competition in the perception of spoken words. *Cognit Psychol* 2002; 45: 220-66.
- Geiger G, Lettvin JY, Zegarra-Moran O. Task-determined strategies of visual process. *Brain Res Cogn Brain Res* 1992; 1: 39-52.
- Geschwind N. Disconnection syndromes in animals and man. *Brain* 1965; 88: 237-294.
- Geschwind N. The organization of language and the brain. *Science* 1970; 170: 940-4.
- Geschwind N. Specializations of the human brain. *Sci Am* 1979; 241: 180-99.
- Geschwind N, Behan P. Left-handedness: association with immune disease, migraine, and developmental learning disorder. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1982; 79: 5097-100.
- Geschwind N, Galaburda AM. Cerebral lateralization. Biological mechanisms, associations, and pathology: I. A hypothesis and a program for research. *Arch Neurol* 1985; 42: 428-59.
- Geschwind N, Levitsky W. Human brain: left-right asymmetries in temporal speech region. *Science* 1968; 161: 186-7.
- Giraud AL, Price C. The constraints functional neuroimaging places on classical models of auditory word processing. *J Cogn Neurosci* 2001; 13: 1-12.
- Godfrey JJ, Syrdal-Lasky AK, Millay KK, Knox CM. Performance of dyslexic children on speech perception tests. *J Exp Child Psychol* 1981; 32: 401-24.
- Gold BT, Buckner RL. Common prefrontal regions coactivate with dissociable posterior regions during controlled semantic and phonological tasks. *Neuron* 2002; 35: 803-12.
- Gorno-Tempini ML, Ciolotti L, Price CJ. Category differences in brain activation studies: where do they come from? *Proc Biol Sci* 2000; 267: 1253-8.
- Gorno-Tempini ML, Price CJ, Josephs O, Vandenberghe R, Cappa SF, Kapur N, et al. The neural systems sustaining face and proper-name processing. *Brain* 1998; 121 (Pt 11): 2103-18.
- Gougenheim G, Rivenc R, Michea R, Sauvageot A. *L'élaboration du français fondamental*. Paris: Didier, 1964.
- Gough PB, Hillinger ML. Learning to read: An unnatural act. *Bulletin of the Orton Society* 1980; 20: 179-196.
- Grainger J, Bouttevin S, Truc C, Bastien M, Ziegler J. Word superiority, pseudoword superiority, and learning to read: a comparison of dyslexic and normal readers. *Brain Lang* 2003; 87: 432-40.
- Grainger J, Jacobs AM. A dual read-out model of word context effects in letter perception: Further investigations of the word superiority effect. *J exp Psychol* 1994; 20: 1158-1176.

- Grainger J, O'Regan JK, Jacobs AM, Segui J. On the role of competing word units in visual word recognition: the neighborhood frequency effect. *Percept Psychophys* 1989; 45: 189-95.
- Green RL, Hutsler JJ, Loftus WC, Tramo MJ, Thomas CE, Silberfarb AW, et al. The caudal infrasyllabic surface in dyslexia: novel magnetic resonance imaging-based findings. *Neurology* 1999; 53: 974-81.
- Greenhouse SW, Geisser S. On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika* 1959; 24: 95-112.
- Gross-Glenn K, Duara R, Barker WW, Loewenstein D, Chang JY, Yoshii F, et al. Positron emission tomographic studies during serial word-reading by normal and dyslexic adults. *J Clin Exp Neuropsychol* 1991; 13: 531-44.
- Gross-Glenn K, Rothenberg S. Evidence for deficit in interhemispheric transfer of information in dyslexic boys. *Int J Neurosci* 1984; 24: 23-35.
- Gross-Tsur V, Manor O, Shalev RS. Developmental dyscalculia: prevalence and demographic features. *Dev Med Child Neurol* 1996; 38: 25-33.
- Gross-Tsur V, Shalev RS, Manor O, Amir N. Developmental right-hemisphere syndrome: clinical spectrum of the nonverbal learning disability. *J Learn Disabil* 1995; 28: 80-6.
- Guerit JM. Revue de la littérature internationale consacrée aux potentiels évoqués en 1997. *Neurophysiol Clin* 1998; 28: 73-9.
- Habib M. *Dyslexie : le cerveau singulier*. Marseille, 1997.
- Habib M. The neurological basis of developmental dyslexia: an overview and working hypothesis. *Brain* 2000; 123 Pt 12: 2373-99.
- Habib M, Robichon F, Levrier O, Khalil R, Salamon G. Diverging asymmetries of temporo-parietal cortical areas: a reappraisal of Geschwind/Galaburda theory. *Brain Lang* 1995; 48: 238-58.
- Hagoort P, Indefrey P, Brown C, Herzog H, Steinmetz H, Seitz RJ. The neural circuitry involved in the reading of German words and pseudowords: A PET study. *J Cogn Neurosci* 1999; 11: 383-98.
- Hagoort P, Wassenaar M, Brown CM. Syntax-related ERP-effects in Dutch. *Brain Res Cogn Brain Res* 2003; 16: 38-50.
- Halit H, de Haan M, Johnson MH. Modulation of event-related potentials by prototypical and atypical faces. *Neuroreport* 2000; 11: 1871-5.
- Hallgren B. Specific dyslexia (congenital word-blindness); a clinical and genetic study. *Acta Neurol Scand Suppl* 1950; 65: 1-287.
- Harm MW, Seidenberg MS. Phonology, reading acquisition, and dyslexia: insights from connectionist models. *Psychol Rev* 1999; 106: 491-528.
- Hart J, Jr., Gordon B. Delineation of single-word semantic comprehension deficits in aphasia, with anatomical correlation. *Ann Neurol* 1990; 27: 226-31.
- Hashimoto Y, Sakai KL. Brain activations during conscious self-monitoring of speech production with delayed auditory feedback: an fMRI study. *Hum Brain Mapp* 2003; 20: 22-8.

- Hecaen H, De Agostini M, Monzon-Montes A. Cerebral organization in left-handers. *Brain Lang* 1981; 12: 261-84.
- Heim S, Eulitz C, Elbert T. Altered hemispheric asymmetry of auditory N100m in adults with developmental dyslexia. *Neuroreport* 2003; 14: 501-4.
- Heim S, Keil A. Large-scale neural correlates of developmental dyslexia. *Eur Child Adolesc Psychiatry* 2004; 13: 125-40.
- Helenius P, Salmelin R, Service E, Connolly JF. Semantic cortical activation in dyslexic readers. *J Cogn Neurosci* 1999a; 11: 535-50.
- Helenius P, Tarkiainen A, Cornelissen P, Hansen PC, Salmelin R. Dissociation of normal feature analysis and deficient processing of letter-strings in dyslexic adults. *Cereb Cortex* 1999b; 9: 476-83.
- Herbster AN, Mintun MA, Nebes RD, Becker JT. Regional cerebral blood flow during word and nonword reading. *Hum Brain Mapp* 1997; 5: 84-92.
- Hickok G, Poeppel D. Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition* 2004; 92: 67-99.
- Hildebrandt N, Caplan D, Sokol S, Torreano L. Lexical factors in the word-superiority effect. *Mem Cognit* 1995; 23: 23-33.
- Hillis AE, Caramazza A. Deficit to stimulus-centered, letter shape representations in a case of "unilateral neglect". *Neuropsychologia* 1991; 29: 1223-40.
- Hillis AE, Newhart M, Heidler J, Barker P, Herskovits E, Degaonkar M. The roles of the "visual word form area" in reading. *Neuroimage* 2005; 24: 548-59.
- Hillyard SA, Hink RF, Schwent VL, Picton TW. Electrical signs of selective attention in the human brain. *Science* 1973; 182: 177-80.
- Hillyard SA, Munte TF. Selective attention to color and location: an analysis with event-related brain potentials. *Percept Psychophys* 1984; 36: 185-98.
- Hinshelwood J. Congenital word-blindness. In: Lewis, editor. London, 1917.
- Hirano S, Kojima H, Naito Y, Honjo I, Kamoto Y, Okazawa H, et al. Cortical processing mechanism for vocalization with auditory verbal feedback. *Neuroreport* 1997; 8: 2379-82.
- Hoeks JC, Stowe LA, Doedens G. Seeing words in context: the interaction of lexical and sentence level information during reading. *Brain Res Cogn Brain Res* 2004; 19: 59-73.
- Holcomb PJ. Semantic priming and stimulus degradation: implications for the role of the N400 in language processing. *Psychophysiology* 1993; 30: 47-61.
- Holcomb PJ, Ackerman PT, Dykman RA. Cognitive event-related brain potentials in children with attention and reading deficits. *Psychophysiology* 1985; 22: 656-67.
- Holcomb PJ, Ackerman PT, Dykman RA. Auditory event-related potentials in attention and reading disabled boys. *Int J Psychophysiol* 1986; 3: 263-273.
- Holmes VM, O'Regan JK. Decomposing French words. In: O'Regan JK and Lévy-Schoen A, editors. *Eye movements: From physiology to cognition*. Vol 459-466. Amsterdam, 1987.
- Holroyd CB, Coles MG. The neural basis of human error processing: reinforcement

- learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychol Rev* 2002; 109: 679-709.
- Hopfinger JB, Maxwell JS. Appearing and disappearing stimuli trigger a reflexive modulation of visual cortical activity. *Brain Res Cogn Brain Res* 2005.
- Horwitz B, Rumsey JM, Donohue BC. Functional connectivity of the angular gyrus in normal reading and dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1998; 95: 8939-44.
- Howard D, Patterson K, Wise R, Brown WD, Friston K, Weiller C, et al. The cortical localization of the lexicons. Positron emission tomography evidence. *Brain* 1992; 115 (Pt 6): 1769-82.
- Howes DH, Solomon RL. Visual duration threshold as a function of word-probability. *J Exp Psychol* 1951; 41: 401-10.
- Hugdahl K. The search continues: casual relationships among dyslexia, anomalous dominance, and immune function. *Brain Cogn* 1994; 26: 275-80.
- Humphreys GW, Riddoch MJ, Price CJ. Top-down processes in object identification: evidence from experimental psychology, neuropsychology and functional anatomy. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 1997; 352: 1275-82.
- Iles J, Walsh V, Richardson A. Visual search performance in dyslexia. *Dyslexia* 2000; 6: 163-77.
- Imbs P. Etudes statistiques sur le vocabulaire français. Dictionnaire des fréquences. Paris: Didier, 1971.
- Indefrey P, Kleinschmidt A, Merboldt KD, Kruger G, Brown C, Hagoort P, et al. Equivalent responses to lexical and nonlexical visual stimuli in occipital cortex: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage* 1997; 5: 78-81.
- Indefrey P, Levelt WJ. The spatial and temporal signatures of word production components. *Cognition* 2004; 92: 101-44.
- Ipata A, Girelli M, Miniussi C, Marzi CA. Interhemispheric transfer of visual information in humans: the role of different callosal channels. *Arch Ital Biol* 1997; 135: 169-82.
- Itier RJ, Taylor MJ. Inversion and contrast polarity reversal affect both encoding and recognition processes of unfamiliar faces: a repetition study using ERPs. *Neuroimage* 2002; 15: 353-72.
- Itier RJ, Taylor MJ. Source analysis of the N170 to faces and objects. *Neuroreport* 2004; 15: 1261-5.
- Jeffries S, Everatt J. Working memory: its role in dyslexia and other specific learning difficulties. *Dyslexia* 2004; 10: 196-214.
- joanette y, goulet P, hannequin d. Right hemisphere and verbal communication. New York: Springer Verlag, 1990.
- Jobard G, Crivello F, Tzourio-Mazoyer N. Evaluation of the dual route theory of reading: a metaanalysis of 35 neuroimaging studies. *Neuroimage* 2003; 20: 693-712.
- Jones DK, Simmons A, Williams SC, Horsfield MA. Non-invasive assessment of axonal fiber connectivity in the human brain via diffusion tensor MRI. *Magn Reson Med* 1999; 42: 37-41.
- Juola JF, Leavitt DD, Chloe CS. Letter identification in word, nonword, and single-letter

- displays. *Bull Psychonomic Soc* 1974; 4: 365-370.
- Kajii N, Osaka N. Optimal viewing position in vertically and horizontally presented Japanese words. *Percept Psychophys* 2000; 62: 1634-44.
- Katayama J, Polich J. Stimulus context determines P3a and P3b. *Psychophysiology* 1998; 35: 23-33.
- Kertesz A, Sheppard A, MacKenzie R. Localization in transcortical sensory aphasia. *Arch Neurol* 1982; 39: 475-8.
- Kibby MY, Marks W, Morgan S, Long CJ. Specific impairment in developmental reading disabilities: a working memory approach. *J Learn Disabil* 2004; 37: 349-63.
- Kim A, Osterhout L. The independence of combinatory semantic processing: Evidence from event-related potentials. *Journal of Memory and Language* 2005; 52: 205-225.
- Klingberg T, Hedehus M, Temple E, Salz T, Gabrieli JD, Moseley ME, et al. Microstructure of temporo-parietal white matter as a basis for reading ability: evidence from diffusion tensor magnetic resonance imaging. *Neuron* 2000; 25: 493-500.
- Kolk HH, Chwilla DJ, van Herten M, Oor PJ. Structure and limited capacity in verbal working memory: a study with event-related potentials. *Brain Lang* 2003; 85: 1-36.
- Kramer AF, Strayer DL. Assessing the development of automatic processing: an application of dual-task and event-related brain potential methodologies. *Biol Psychol* 1988; 26: 231-67.
- Kraus N, McGee TJ, Carrell TD, Zecker SG, Nicol TG, Koch DB. Auditory neurophysiologic responses and discrimination deficits in children with learning problems. *Science* 1996; 273: 971-3.
- Kronbichler M, Hutzler F, Wimmer H, Mair A, Staffen W, Ladurner G. The visual word form area and the frequency with which words are encountered: evidence from a parametric fMRI study. *Neuroimage* 2004; 21: 946-53.
- Kuhl PK. Theoretical contributions of tests on animals to the special-mechanisms debate in speech. *Exp Biol* 1986; 45: 233-65.
- Kuperberg GR, Sitnikova T, Caplan D, Holcomb PJ. Electrophysiological distinctions in processing conceptual relationships within simple sentences. *Brain Res Cogn Brain Res* 2003; 17: 117-29.
- Kuriki S, Takeuchi F, Hirata Y. Neural processing of words in the human extrastriate visual cortex. *Brain Res Cogn Brain Res* 1998; 6: 193-203.
- Kutas M. Event-related brain potentials (ERPs) elicited during rapid serial visual presentation of congruous and incongruous sentences. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl* 1987; 40: 406-11.
- Kutas M. Views on how the electrical activity that the brain generates reflects the functions of different language structures. *Psychophysiology* 1997; 34: 383-398.
- Kutas M, Dale A. Electrical and magnetic readings of mental functions. In: Rugg MD, editor. *Cognitive Neuroscience*: Psychology Press, 1997: 197-242.
- Kutas M, Hillyard SA. Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science* 1980; 207: 203-5.
- Kutas M, McCarthy G, Donchin E. Augmenting mental chronometry: the P300 as a

- measure of stimulus evaluation time. *Science* 1977; 197: 792-5.
- Kutas M, Van Petten C, Besson M. Event-related potential asymmetries during the reading of sentences. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1988; 69: 218-33.
- Lavidor M, Ellis AW. Word length and orthographic neighborhood size effects in the left and right cerebral hemispheres. *Brain Lang* 2002; 80: 45-62.
- Le Bihan D, Breton E. Imagerie de diffusion in vivo par résonance magnétique nucléaire. *Cr Acad Sci (Paris)* 1985; 301: 1109-1112.
- Lenneberg EH. *Biological foundations of Language*. New York, 1967.
- Leppanen PH, Lyytinen H. Auditory event-related potentials in the study of developmental language-related disorders. *Audiol Neurootol* 1997; 2: 308-40.
- Levelt WJ. Monitoring and self-repair in speech. *Cognition* 1983; 14: 41-104.
- Levelt WJM. *Speaking: From Intention to Articulation*. Cambridge: MIT Press, 1989.
- Levelt WJM, Roelofs A, Meyer A. A theory of lexical access in speech production. *Behavioral and Brain Sciences* 1999; 22: 1-75.
- Leventhal AG, Ault SJ, Vitek DJ. The nasotemporal division in primate retina: the neural bases of macular sparing and splitting. *Science* 1988; 240: 66-7.
- Levi DM, Klein SA, Aitsebaomo AP. Vernier acuity, crowding and cortical magnification. *Vision Res* 1985; 25: 963-77.
- Lieberman AM. Segmentation of the spoken word and reading acquisition. *Bulletin of the Orton Society* 1973; 23: 65-77.
- Lieberman AM, Cooper FS, Shankweiler DP, Studdert-Kennedy M. Perception of the speech code. *Psychol Rev* 1967; 74: 431-61.
- Lichtheim L. On aphasia. *Brain* 1885; 7: 433-484.
- Liebenthal E, Binder JR, Spitzer SM, Possing ET, Medler DA. Neural Substrates of Phonemic Perception. *Cereb Cortex* 2005a.
- Liebenthal E, Desai R, Waldron EJ, Binder JR. Neural substrates of phonemic categorization in the left temporal lobe. *Cognitive Neuroscience Society*. New York, 2005b.
- Lieberman P. On the nature and evolution of the neural bases of human language. *Am J Phys Anthropol* 2002; Suppl 35: 36-62.
- Lindgren SD, De Renzi E, Richman LC. Cross-national comparisons of developmental dyslexia in Italy and the United States. *Child Dev* 1985; 56: 1404-17.
- Livingstone MS, Rosen GD, Drislane FW, Galaburda AM. Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1991; 88: 7943-7.
- Lovegrove WJ, Garzia RP, Nicholson SB. Experimental evidence for a transient system deficit in specific reading disability. *J Am Optom Assoc* 1990; 61: 137-46.
- Lovrich D, Stamm JS. Event-related potential and behavioral correlates of attention in reading retardation. *J clin neuropsychol* 1983; 5: 13-37.
- Lubs HA, Duara R, Levin B, Jallad B, Lubs ML, Rabin M. Genetics behavior and brain imaging. In: Duane D and Gray D, editors. *The Reading Brain*. Parkton Maryland:

- York Press, 1991.
- Luck SJ. Effects of spatial cuing on luminance detectability: psychophysical and electrophysiological evidence for early selection. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1994; 20: 887-904.
- Luck SJ. Sources of dual-task interference: evidence from human electrophysiology. *Psychol Sci* 1998; 9: 223-227.
- Luck SJ, Hillyard SA. The operation of selective attention at multiple stages of processing: evidence from human and monkey electrophysiology. In: Gazzaniga M, editor. *The new cognitive neurosciences*: MIT Press, 1999: 687-700.
- Luck SJ, Woodman GF, Vogel EK. Event-related potential studies of attention. *Trends Cogn Sci* 2000; 4: 432-440.
- Lundberg I, Frost JA, O. P. Effects of an extensive program for stimulating phonological awareness in preschool children. *J Exp Child Psychol* 1988; 18: 201-12.
- Luo CR, Anderson JM, Caramazza A. Impaired stimulus-driven orienting of attention and preserved goal-directed orienting of attention in unilateral visual neglect. *Am J Psychol* 1998; 111: 487-507.
- MacLeod CM. Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review. *Psychol Bull* 1991; 109: 163-203.
- Manelis L. The effect of meaningfulness in tachistoscopic word perception. *Percept & Psychophys* 1974; 16: 182-192.
- Mangun GR, Hillyard SA. Spatial gradients of visual attention: behavioral and electrophysiological evidence. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1988; 70: 417-28.
- Mangun GR, Hillyard SA. Modulations of sensory-evoked brain potentials indicate changes in perceptual processing during visual-spatial priming. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1991; 17: 1057-1074.
- Manis FR, McBride-Chang C, Seidenberg MS, Keating P, Doi LM, Munson B, et al. Are speech perception deficits associated with developmental dyslexia? *J Exp Child Psychol* 1997; 66: 211-35.
- Marin OSM. CAT scans of five deep dyslexic patients. In: Coltheart M, Patterson K and Marshall JC, editors. *Deep Dyslexia*. London: Routledge, 1980: 407-433.
- Markee TE, Brown WS, Moore LH. Callosal function in dyslexia: evoked potential interhemispheric transfer time and bilateral field advantage. *Dev Neuropsychol* 1996; 12: 409-28.
- Marshall JC, Newcombe F. Patterns of paralexia: a psycholinguistic approach. *J Psycholinguist Res* 1973; 2: 175-99.
- Marslen-Wilson W. Function and process in spoken word recognition: a tutorial review. In: Bouma H and Bouwhuis DG, editors. *Attention and performance X: Control of language processes*. Hillsdale: Erlbaum, L., 1984: 125-150.
- Marslen-Wilson W, Tyler LK. The temporal structure of spoken language understanding. *Cognition* 1980; 8: 1-71.
- Marslen-Wilson W, Tyler LK, Waksler R, Older L. Morphology and meaning in the

- English mental lexicon. *Psychological Review* 1994; 101: 3-33.
- Marslen-Wilson W, Welsh A. Processing interactions and lexical access during word recognition in continuous speech. *Cognitive Psychology* 1978; 10: 29-63.
- Marslen-Wilson WD. Functional parallelism in spoken word-recognition. *Cognition* 1987; 25: 71-102.
- Martin A, Haxby JV, Lalonde FM, Wiggs CL, Ungerleider LG. Discrete cortical regions associated with knowledge of color and knowledge of action. *Science* 1995; 270: 102-5.
- Martin A, Wiggs CL, Ungerleider LG, Haxby JV. Neural correlates of category-specific knowledge. *Nature* 1996; 379: 649-52.
- Martin JH. The collective electrical behavior of cortical neurons: the electroencephalogram and the mechanisms of epilepsy. In: Kandel ER, Schwartz JH and Jessell TM, editors. *Principles of neural science*. New York: Elsevier, 1991: 391-777.
- Martinet A. Linguistique appliquée. In: Denoël, editor. *La linguistique. Guide alphabétique*. Paris, 1969: 209-214.
- Mattis T, French JH, Rapin I. Dyslexia in children and young adults: three independent neuropsychological syndromes. *Dev Med Child Neurol* 1975; 17: 150-63.
- Mayall K. Case-mixing effects on children's word recognition: lexical feedback and development. *Q J Exp Psychol A* 2002; 55: 525-42.
- Mayall K, Humphreys GW, Olson A. Disruption to word or letter processing? The origins of case-mixing effects. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 1997; 23: 1275-86.
- Mazoyer BM, Tzourio N, Frak V, Syrota A, Mura-Yama N, Levrier D. The cortical representation of speech. *J Cogn Neurosci* 1993; 5: 467-479.
- McCandliss BD, Cohen L, Dehaene S. The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends Cogn Sci* 2003; 7: 293-299.
- McCarthy G, Donchin E. A metric for thought: a comparison of P300 latency and reaction time. *Science* 1981; 211: 77-80.
- McCarthy G, Nobre AC. Modulation of semantic processing by spatial selective attention. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1993; 88: 210-9.
- McClelland JL. Preliminary letter identification in the perception of words and nonwords. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1976; 2: 80-91.
- McClelland JL. On the time relations of mental processes: An examination of systems of processes in cascade. *Psychol Rev* 1979; 86: 287-330.
- McClelland JL, Elman JL. The TRACE model of speech perception. *Cognit Psychol* 1986; 18: 1-86.
- McClelland JL, Johnston JC. The role of familiar units in perception of words and nonwords. *Percept & Psychophys* 1977; 22: 249-261.
- McClelland JL, Rumelhart DE. An interactive activation model of context effects in letter perception: Part I. An account of basic findings. *Psychological Review* 1981; 88: 375-407.
- McConkie GW, Kerr PW, Reddix MD, Zola D. Eye movement control during reading: I.

- The location of initial eye fixations on words. *Vision Res* 1988; 28: 1107-18.
- McCusker LX, Hillinger ML, Bias RG. Phonological recoding and reading. *Psychological Bulletin* 1981; 89: 217-245.
- McDermott KB, Petersen SE, Watson JM, Ojemann JG. A procedure for identifying regions preferentially activated by attention to semantic and phonological relations using functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia* 2003; 41: 293-303.
- McEvoy LK, Smith ME, Gevins A. Dynamic cortical networks of verbal and spatial working memory: effects of memory load and task practice. *Cereb Cortex* 1998; 8: 563-74.
- McGuire PK, Silbersweig DA, Frith CD. Functional neuroanatomy of verbal self-monitoring. *Brain* 1996; 119 (Pt 3): 907-17.
- Mechelli A, Humphreys GW, Mayall K, Olson A, Price CJ. Differential effects of word length and visual contrast in the fusiform and lingual gyri during reading. *Proc Biol Sci* 2000; 267: 1909-13.
- Mesulam MM. Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory. *Ann Neurol* 1990; 28: 597-613.
- Meunier F, Segui J. Morphological priming effect: the role of surface frequency. *Brain Lang* 1999; 68: 54-60.
- Meyer DE, Kieras DE. A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 1. Basic mechanisms. *Psychol Rev* 1997; 104: 3-65.
- Meyer DE, Schvaneveldt RW. Facilitation in recognizing pairs of words: evidence of a dependence between retrieval operations. *J Exp Psychol* 1971; 90: 227-34.
- Miller-Shaul S, Breznitz Z. Electrocortical measures during a lexical decision task: a comparison between elementary school-aged normal and dyslexic readers and adult normal and dyslexic readers. *J Genet Psychol* 2004; 165: 399-424.
- Mitterer JO. There are at least two kinds of poor readers: whole-word poor readers and recoding poor readers. *Can J Psychol* 1982; 36: 445-61.
- Mody M, Studdert-Kennedy M, Brady S. Speech perception deficits in poor readers: auditory processing or phonological coding? *J Exp Child Psychol* 1997; 64: 199-231.
- Moffat SD, Hampson E, Wickett JC, Vernon PA, Lee DH. Testosterone is correlated with regional morphology of the human corpus callosum. *Brain Res* 1997; 767: 297-304.
- Molko N, Cohen L, Mangin JF, Chochon F, Lehericy S, Le Bihan D, et al. Visualizing the neural bases of a disconnection syndrome with diffusion tensor imaging. *J Cogn Neurosci* 2002; 14: 629-36.
- Moore CJ, Price CJ. Three distinct ventral occipitotemporal regions for reading and object naming. *Neuroimage* 1999; 10: 181-92.
- Moore LH, Brown WS, Markee TE, Theberge DC, Zvi JC. Bimanual coordination in dyslexic adults. *Neuropsychologia* 1995; 33: 781-93.
- Morais J, Cluytens M, Alegria J. Segmentation abilities of dyslexics and normal readers. *Percept Mot Skills* 1984; 58: 221-2.
- Morton J. Word recognition. In: Morton J and Marshall JC, editors. *Psycholinguistics*

- Series. Vol 2. London: Elek, P., 1979: 107-156.
- Morton J. The logogen model and orthographic structure. In: Frith U, editor. Cognitive processes in spelling. London: Academic Press, 1980.
- Morton J. Disintegrating the lexicon: an information processing approach. In: Mehler J, Walker ECT and Garrett MF, editors. Perspectives on mental representation. Hillsdale: Erlbaum, L., 1982: 89-109.
- Morton J, Patterson K. A new attempt at an interpretation, or an attempt at a new interpretation. London: Routledge and Kegan Paul, 1980.
- Moseley ME, Cohen Y, Kucharczyk J, Mintorovitch J, Asgari HS, Wendland MF, et al. Diffusion-weighted MR imaging of anisotropic water diffusion in cat central nervous system. *Radiology* 1990; 176: 439-45.
- Mummery CJ, Ashburner J, Scott SK, Wise RJ. Functional neuroimaging of speech perception in six normal and two aphasic subjects. *J Acoust Soc Am* 1999; 106: 449-57.
- Mummery CJ, Patterson K, Hodges J, Price C. Organisation of the semantic system - divisible by what? *J Cogn Neurosci* 1998; 10: 766-777.
- Munte TF, Say T, Clahsen H, Schiltz K, Kutas M. Decomposition of morphologically complex words in English: evidence from event-related brain potentials. *Brain Res Cogn Brain Res* 1999; 7: 241-53.
- Munte TF, Szentkuti A, Wieringa BM, Matzke M, Johannes S. Human brain potentials to reading syntactic errors in sentences of different complexity. *Neurosci Lett* 1997; 235: 105-8.
- Murphy LA, Pollatsek A, Well AD. Developmental dyslexia and word retrieval deficits. *Brain Lang* 1988; 35: 1-23.
- Musso M, Moro A, Glauche V, Rijntjes M, Reichenbach J, Buchel C, et al. Broca's area and the language instinct. *Nat Neurosci* 2003; 6: 774-81.
- Näätänen R. Event-related potentials in research of cognitive processes - a classification of components. In: Van der Meer E and Hoffman J, editors. Knowledge-aided information processing. Amsterdam, 1987: 241-273.
- Naatanen R, Gaillard AW, Mantysalo S. Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychol (Amst)* 1978; 42: 313-29.
- Naatanen R, Teder W, Alho K, Lavikainen J. Auditory attention and selective input modulation: a topographical ERP study. *Neuroreport* 1992; 3: 493-6.
- Navon D, Miller J. Queuing or sharing? A critical evaluation of the single-bottleneck notion. *Cognit Psychol* 2002; 44: 193-251.
- Nazir TA. On the role of rfixations in letter strings: the influence of oculomotor factors. *Percept Psychophys* 1991; 49: 373-89.
- Nazir TA. On the relation between the optimal and the preferred viewing position in words during reading. In: Ydewalle G and van Rensbergen J, editors. Perception & Cognition: advances in eye movement research. Amsterdam, 1993: 349-361.
- Nazir TA. Traces of print along the visual pathway. In: Kennedy A, Radach R, Heller D and Pynte J, editors. Reading as a perceptual process. Amsterdam: Elsevier, 2000:

3-22.

- Nazir TA, Ben-Boutayab N, Decoppet N, Deutsch A, Frost R. Reading habits, perceptual learning, and recognition of printed words. *Brain Lang* 2004; 88: 294-311.
- Nazir TA, Heller D, Sussmann C. Letter visibility and word recognition: the optimal viewing position in printed words. *Percept Psychophys* 1992; 52: 315-28.
- Nazir TA, Jacobs AM, O'Regan JK. Letter legibility and visual word recognition. *Mem Cognit* 1998; 26: 810-21.
- Nazir TA, Montant M. Le langage écrit et ses troubles chez l'adulte. In: Solal, editor. *Approche cognitive des troubles de la lecture et de l'écriture chez l'enfant et l'adulte*. Marseille, 1996: 181-194.
- Nazir TA, O'Regan JK, Jacobs AM. On words and their letters. *Bull Psychonomic Soc* 1991; 29: 171-174.
- Neville H, Coffey S, Holcomb PJ, Tallal P. The neurobiology of sensory and language processing in language-impaired children. *J Cogn Neurosci* 1993; 5: 235-253.
- Neville HJ, Lawson D. Attention to central and peripheral visual space in a movement detection task: an event-related potential and behavioral study. I. Normal hearing adults. *Brain Res* 1987; 405: 253-67.
- Nicolson RI, Fawcett AJ, Dean P. Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis. *Trends Neurosci* 2001; 24: 508-11.
- Nobre AC, Allison T, McCarthy G. Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature* 1994; 372: 260-3.
- Norris D. A quantitative multiple-levels model of reading aloud. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1994; 20: 155-168.
- Nunez PL. *Electric fields of the brain*. New York: Oxford University Press, 1981.
- Ono T, Matsuo A, Baba H, Ono K. Is a cortical spike discharge "transferred" to the contralateral cortex via the corpus callosum?: An intraoperative observation of electrocorticogram and callosal compound action potentials. *Epilepsia* 2002; 43: 1536-42.
- O'Regan JK, Jacobs AM. Optimal viewing position effects in word recognition: a challenge to current theory. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1992; 18: 185-197.
- O'Regan JK, Lévy-Schoen A. Eye movement strategy and tactics in word recognition and reading. In: Coltheart M, editor. *Attention and performance XII: the psychology of reading*. Hillsdale: Erlbaum, N.J., 1987: 363-383.
- O'Regan JK, Levy-Schoen A, Pynte J, Brugailere B. Convenient fixation location within isolated words of different length and structure. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1984; 10: 250-7.
- Orton ST. Word-blindness in school children. *Arch Neurol Psychiat* 1925; 14: 581-615.
- Paap KR, Johansen LS. The case of the vanishing frequency effect: A retest of the verification model. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1994; 20: 1129-1157.
- Paap KR, Newsome SL, McDonald JE, Schvaneveldt RW. An activation--verification model for letter and word recognition: the word-superiority effect. *Psychol Rev* 1982; 89: 573-94.

-
- Paap KR, Newsome SL, Noel RW. Word shape's in poor shape for the race to the lexicon. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1984; 10: 413-28.
- Pammer K, Hansen PC, Kringelbach ML, Holliday I, Barnes G, Hillebrand A, et al. Visual word recognition: the first half second. *Neuroimage* 2004; 22: 1819-25.
- Patterson K, Hodges JR. Deterioration of word meaning: implications for reading. *Neuropsychologia* 1992; 30: 1025-40.
- Patterson K, Shewell C. Speak and spell: dissociations and word class effects. In: Coltheart M, Sartori G and Job R, editors. *The cognitive Neuropsychology of Language*. London: Erlbaum, 1987: 273-294.
- Paul I, Bott C, Heim S, Eulitz C, Elbert T. Reduced hemispheric asymmetry of the auditory N260m in dyslexia. *Neuropsychologia* 2005.
- Paulesu E, Demonet JF, Fazio F, McCrory E, Chanoine V, Brunswick N, et al. Dyslexia: cultural diversity and biological unity. *Science* 2001; 291: 2165-7.
- Paulesu E, Frith CD, Frackowiak RS. The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature* 1993; 362: 342-5.
- Paulesu E, Frith U, Snowling M, Gallagher A, Morton J, Frackowiak RS, et al. Is developmental dyslexia a disconnection syndrome? Evidence from PET scanning. *Brain* 1996; 119 (Pt 1): 143-57.
- Paus T, Zatorre R, Hofle N, Caramanos Z, Gotman J, Petrides M, et al. Time-related changes in neural systems underlying attention and arousal during the performance of an auditory vigilance task. *J Cogn Neurosci* 1997; 9: 392-408.
- Peressotti F, Grainger J. The role of letter identity and letter position in orthographic priming. *Percept Psychophys* 1999; 61: 691-706.
- Pernet C, Celsis P, Demonet JF. Selective response to letter categorization within the left fusiform gyrus. *Neuroimage* 2005.
- Pernier J, Bertrand O. Le cerveau en action. In: Dehaene S, editor. *Imagerie cérébrale fonctionnelle en psychologie cognitive*. Paris: Presses Universitaires de France, 1997: 71-95.
- Petersen SE, Fox PT, Posner MI, Mintun M, Raichle ME. Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature* 1988; 331: 585-9.
- Petersen SE, Fox PT, Snyder AZ, Raichle ME. Activation of extrastriate and frontal cortical areas by visual words and word-like stimuli. *Science* 1990; 249: 1041-4.
- Picton TW, Bentin S, Berg P, Donchin E, Hillyard SA, Johnson R, Jr., et al. Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: recording standards and publication criteria. *Psychophysiology* 2000; 37: 127-52.
- Pinker S, Ullman MT. The past and future of the past tense. *Trends Cogn Sci* 2002; 6: 456-463.
- Plante E, Swisher L, Vance R, Rapcsak S. MRI findings in boys with specific language impairment. *Brain Lang* 1991; 41: 52-66.
- Plaut DC, McClelland JL, Seidenberg MS, Patterson K. Understanding normal and impaired word reading: computational principles in quasi-regular domains. *Psychol*

- Rev 1996; 103: 56-115.
- Plaut DC, Shallice T. Deep dyslexia: a case study of connectionist neuropsychology. *Cognitive Neuropsychology* 1993; 10: 377-500.
- Poldrack RA, Wagner AD, Prull MW, Desmond JE, Glover GH, Gabrieli JD. Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *Neuroimage* 1999; 10: 15-35.
- Polich J. Attention, probability, and task demands as determinants of P300 latency from auditory stimuli. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1986; 63: 251-9.
- Polich J, Donchin E. P300 and the word frequency effect. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1988; 70: 33-45.
- Polich J, Kok A. Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review. *Biol Psychol* 1995; 41: 103-46.
- Polk TA, Stallcup M, Aguirre GK, Alsop DC, D'Esposito M, Detre JA, et al. Neural specialization for letter recognition. *J Cogn Neurosci* 2002; 14: 145-59.
- Posner MI. Orienting of attention. *Q J Exp Psychol* 1980; 32: 3-25.
- Posner MI, Abdullaev YG, McCandliss BD, Sereno SC. Neuroanatomy, circuitry and plasticity of word reading. *Neuroreport* 1999; 10: R12-23.
- Posner MI, Gilbert CD. Attention and primary visual cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1999; 96: 2585-7.
- Posner MI, Petersen SE, Fox PT, Raichle ME. Localization of cognitive operations in the human brain. *Science* 1988; 240: 1627-31.
- Posner MI, Snyder CR, Davidson BJ. Attention and the detection of signals. *J Exp Psychol* 1980; 109: 160-74.
- Poupon C, Clark CA, Frouin V, Regis J, Bloch I, Le Bihan D, et al. Regularization of diffusion-based direction maps for the tracking of brain white matter fascicles. *Neuroimage* 2000; 12: 184-95.
- Price C, Moore C, Friston K. Substractions, conjunctions and interactions in experimental design of activation studies. *Hum Brain Mapp* 1997a; 5: 264-272.
- Price CJ. The anatomy of language: contributions from functional neuroimaging. *J Anat* 2000; 197 Pt 3: 335-59.
- Price CJ, Devlin JT. The myth of the visual word form area. *Neuroimage* 2003; 19: 473-81.
- Price CJ, Friston KJ. Cognitive conjunction: a new approach to brain activation experiments. *Neuroimage* 1997a; 5: 261-70.
- Price CJ, Friston KJ. The temporal dynamics of reading: a PET study. *Proc Biol Sci* 1997b; 264: 1785-91.
- Price CJ, Mechelli A. Reading and reading disturbance. *Curr Opin Neurobiol* 2005; 15: 231-8.
- Price CJ, Moore CJ, Frackowiak RS. The effect of varying stimulus rate and duration on brain activity during reading. *Neuroimage* 1996a; 3: 40-52.
- Price CJ, Moore CJ, Humphreys GW, Wise RJS. Segregating semantic from phonological processes during reading. *J Cogn Neurosci* 1997b; 9: 727-733.

- Price CJ, Winterburn D, Giraud AL, Moore CJ, Noppeney U. Cortical localisation of the visual and auditory word form areas: a reconsideration of the evidence. *Brain Lang* 2003; 86: 272-86.
- Price CJ, Wise RJ, Frackowiak RS. Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords. *Cereb Cortex* 1996b; 6: 62-70.
- Price CJ, Wise RJ, Warburton EA, Moore CJ, Howard D, Patterson K, et al. Hearing and saying. The functional neuro-anatomy of auditory word processing. *Brain* 1996c; 119 (Pt 3): 919-31.
- Price CJ, Wise RJ, Watson JD, Patterson K, Howard D, Frackowiak RS. Brain activity during reading. The effects of exposure duration and task. *Brain* 1994; 117 (Pt 6): 1255-69.
- Prinzmetal W. The word-superiority effect does not require a T-scope. *Percept & Psychophys* 1992; 51: 473-484.
- Proverbio AM, Cok B, Zani A. Electrophysiological measures of language processing in bilinguals. *J Cogn Neurosci* 2002a; 14: 994-1017.
- Proverbio AM, Esposito P, Zani A. Early involvement of the temporal area in attentional selection of grating orientation: an ERP study. *Brain Res Cogn Brain Res* 2002b; 13: 139-51.
- Proverbio AM, Vecchi L, Zani A. From orthography to phonetics: ERP measures of grapheme-to-phoneme conversion mechanisms in reading. *J Cogn Neurosci* 2004; 16: 301-17.
- Proverbio AM, Zani A. Time course of brain activation during graphemic/phonologic processing in reading: an ERP study. *Brain Lang* 2003; 87: 412-20.
- Pugh KR, Shaywitz BA, Shaywitz SE, Constable RT, Skudlarski P, Fulbright RK, et al. Cerebral organization of component processes in reading. *Brain* 1996; 119 (Pt 4): 1221-38.
- Pulvermüller F. Words in the brain's language. *Behavioral and Brain Sciences* 1998; 22: 253-336.
- Raichle ME, Fiez JA, Videen TO, MacLeod AM, Pardo JV, Fox PT, et al. Practice-related changes in human brain functional anatomy during nonmotor learning. *Cereb Cortex* 1994; 4: 8-26.
- Ramsay SC, Adams L, Murphy K, Corfield DR, Grootenck S, Bailey DL, et al. Regional cerebral blood flow during volitional expiration in man: a comparison with volitional inspiration. *J Physiol* 1993; 461: 85-101.
- Ramus F. Dyslexia. Talk of two theories. *Nature* 2001; 412: 393-5.
- Ramus F. Neurobiology of dyslexia: a reinterpretation of the data. *Trends Neurosci* 2004; 27: 720-6.
- Ramus F, Rosen S, Dakin SC, Day BL, Castellote JM, White S, et al. Theories of developmental dyslexia: insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain* 2003; 126: 841-65.
- Rapin I, Allen DA. Syndromes in developmental dysphasia and adult aphasia. *Res Publ Assoc Res Nerv Ment Dis* 1988; 66: 57-75.

- Raymond JE, Shapiro KL, Arnell KM. Temporary suppression of visual processing in an RSVP task: an attentional blink? *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1992; 18: 849-60.
- Rayner K, Foorman BR, Perfetti CA, Pesetsky D, Seidenberg MS. How psychological science informs the teaching of reading. *Psychol Sci* 2001; 2: 31-74.
- Rayner K, Pollatsek A. *The psychology of reading*. Prentice-Hall, Inc., 1989.
- Rayner K, Well AD, Pollatsek A. Asymmetry of the effective visual field in reading. *Percept Psychophys* 1980; 27: 537-44.
- Reed MA. Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading disabled children. *J Exp Child Psychol* 1989; 48: 270-92.
- Reicher GM. Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *J Exp Psychol* 1969; 81: 275-80.
- Remez RE, Rubin PE, Pisoni DB, Carrell TD. Speech perception without traditional speech cues. *Science* 1981; 212: 947-9.
- Riesenhuber M, Poggio T. Hierarchical models of object recognition in cortex. *Nat Neurosci* 1999; 2: 1019-25.
- Robichon F, Besson M, Habib M. Mise en évidence d'anomalies neurobiologiques chez le dyslexique adulte : étude des potentiels évoqués lors d'une tâche de lecture. *Rev Neuropsychol* 1994; 4: 259-260.
- Robichon F, Habib M. Abnormal callosal morphology in male adult dyslexics: relationships to handedness and phonological abilities. *Brain Lang* 1998; 62: 127-46.
- Rodriguez-Fornells A, Rotte M, Heinze HJ, Nosselt T, Munte TF. Brain potential and functional MRI evidence for how to handle two languages with one brain. *Nature* 2002; 415: 1026-9.
- Rossini PM, Barker AT, Berardelli A, Caramia MD, Caruso G, Cracco RQ, et al. Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord and roots: basic principles and procedures for routine clinical application. Report of an IFCN committee. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1994; 91: 79-92.
- Rossion B, Joyce CA, Cottrell GW, Tarr MJ. Early lateralization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex. *Neuroimage* 2003; 20: 1609-24.
- Roux FE, Lubrano V, Lauwers-Cances V, Tremoulet M, Mascott CR, Demonet JF. Intra-operative mapping of cortical areas involved in reading in mono- and bilingual patients. *Brain* 2004; 127: 1796-810.
- Rudell AP, Hua J. The recognition potential, word difficulty, and individual reading ability: on using event-related potentials to study perception. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1997; 23: 1170-95.
- Rugg MD. Event-related potentials in phonological matching tasks. *Brain Lang* 1984; 23: 225-40.
- Rugg MD, Milner AD, Lines CR, Phalp R. Modulation of visual event-related potentials by spatial and non-spatial visual selective attention. *Neuropsychologia* 1987; 25: 85-96.

-
- Rugg MDD, M. C. Melan, C. An ERP study of the effects of within and across-modality word repetition. *Language and Cognitive Processes* 1993; 8: 337-640.
- Rumsey JM, Andreason P, Zametkin AJ, Aquino T, King AC, Hamburger SD, et al. Failure to activate the left temporoparietal cortex in dyslexia. An oxygen 15 positron emission tomographic study. *Arch Neurol* 1992; 49: 527-34.
- Rumsey JM, Horwitz B, Donohue BC, Nace K, Maisog JM, Andreason P. Phonological and orthographic components of word recognition. A PET-rCBF study. *Brain* 1997a; 120 (Pt 5): 739-59.
- Rumsey JM, Horwitz B, Donohue BC, Nace KL, Maisog JM, Andreason P. A functional lesion in developmental dyslexia: left angular gyral blood flow predicts severity. *Brain Lang* 1999; 70: 187-204.
- Rumsey JM, Nace K, Donohue B, Wise D, Maisog JM, Andreason P. A positron emission tomographic study of impaired word recognition and phonological processing in dyslexic men. *Arch Neurol* 1997b; 54: 562-73.
- Rumsey JM, Zametkin AJ, Andreason P, Hanahan AP, Hamburger SD, Aquino T, et al. Normal activation of frontotemporal language cortex in dyslexia, as measured with oxygen 15 positron emission tomography. *Arch Neurol* 1994; 51: 27-38.
- Salmelin R, Helenius P, Service E. Neurophysiology of fluent and impaired reading: a magnetoencephalographic approach. *J Clin Neurophysiol* 2000; 17: 163-74.
- Salmelin R, Service E, Kiesila P, Uutela K, Salonen O. Impaired visual word processing in dyslexia revealed with magnetoencephalography. *Ann Neurol* 1996; 40: 157-62.
- Saron CD, Davidson RJ. Visual evoked potential measures of interhemispheric transfer time in humans. *Behav Neurosci* 1989; 103: 1115-38.
- Sauseng P, Bergmann J, Wimmer H. When does the brain register deviances from standard word spellings?--An ERP study. *Brain Res Cogn Brain Res* 2004; 20: 529-32.
- Savin HB, Bever TG. The non-perceptual reality of the phoneme. *JVLVB* 1970; 9: 295-302.
- Schlaug G, Jancke L, Huang Y, Staiger JF, Steinmetz H. Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia* 1995; 33: 1047-55.
- Schulte-Korne G, Deimel W, Bartling J, Remschmidt H. Auditory processing and dyslexia: evidence for a specific speech processing deficit. *Neuroreport* 1998; 9: 337-40.
- Scott SK, Blank CC, Rosen S, Wise RJ. Identification of a pathway for intelligible speech in the left temporal lobe. *Brain* 2000; 123 Pt 12: 2400-6.
- Segalowitz S, Chevalier H. Event-related potential (ERP) research in Neurolinguistics. In: Stemmer B and Whitaker H, editors. *Handbook of Neurolinguistics*. San Diego: Academic Press, 1998: 96-122.
- Segui J. The syllable: a basic perceptual unit in speech processing? In: Bouma H and Bouwhuis DG, editors. *Attention and performance X: Control of language processes*. Hillsdale: Erlbaum, L., 1984: 165-181.
- Seidenberg MS, McClelland JL. A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychol Rev* 1989; 96: 523-68.

- Seidenberg MS, McClelland JL. More words but still no lexicon: Reply to Besner et al (1990). *Psychol Rev* 1990; 97: 447-452.
- Seltzer B, Pandya DN. Parietal, temporal, and occipital projections to cortex of the superior temporal sulcus in the rhesus monkey: a retrograde tracer study. *J Comp Neurol* 1994; 343: 445-63.
- Sereno SC, Brewer CC, O'Donnell PJ. Context effects in word recognition: evidence for early interactive processing. *Psychol Sci* 2003; 14: 328-33.
- Sereno SC, Rayner K. The when and where of reading in the brain. *Brain Cogn* 2000; 42: 78-81.
- Sereno SC, Rayner K, Posner MI. Establishing a time-line of word recognition: evidence from eye movements and event-related potentials. *Neuroreport* 1998; 9: 2195-200.
- Serniclaes W, Sprenger-Charolles L, Carre R, Demonet JF. Perceptual discrimination of speech sounds in developmental dyslexia. *J Speech Lang Hear Res* 2001; 44: 384-99.
- Shaywitz BA, Shaywitz SE, Blachman BA, Pugh KR, Fulbright RK, Skudlarski P, et al. Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically- based intervention. *Biol Psychiatry* 2004; 55: 926-33.
- Shaywitz BA, Shaywitz SE, Pugh KR, Mencl WE, Fulbright RK, Skudlarski P, et al. Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biol Psychiatry* 2002; 52: 101-10.
- Shaywitz SE. Dyslexia. *N Engl J Med* 1998; 338: 307-12.
- Shaywitz SE, Shaywitz BA. Dyslexia (specific reading disability). *Biol Psychiatry* 2005; 57: 1301-9.
- Shaywitz SE, Shaywitz BA, Pugh KR, Fulbright RK, Constable RT, Mencl WE, et al. Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1998; 95: 2636-41.
- Shulman GL, Corbetta M, Buckner RL, Raichle ME, Fiez JA, Miezin FM, et al. Top-down modulation of early sensory cortex. *Cereb Cortex* 1997a; 7: 193-206.
- Shulman GL, Fiez JA, Corbetta M, Buckner RL, Meizin FM, Raichle ME. Common blood flow changes across visual tasks: II. Decreases in cerebral cortex. *J Cogn Neurosci* 1997b; 9: 648-663.
- Sigman M, Gilbert CD. Learning to find a shape. *Nat Neurosci* 2000; 3: 264-9.
- Simon G, Bernard C, Largy P, Lalonde R, Rebai M. Chronometry of visual word recognition during passive and lexical decision tasks: an ERP investigation. *Int J Neurosci* 2004; 114: 1401-32.
- Simon O, Mangin JF, Cohen L, Le Bihan D, Dehaene S. Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron* 2002; 33: 475-87.
- Simos PG, Breier JI, Fletcher JM, Foorman BR, Bergman E, Fishbeck K, et al. Brain activation profiles in dyslexic children during non-word reading: a magnetic source imaging study. *Neurosci Lett* 2000; 290: 61-5.
- Simos PG, Fletcher JM, Bergman E, Breier JI, Foorman BR, Castillo EM, et al.

- Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology* 2002; 58: 1203-13.
- Siok WT, Perfetti CA, Jin Z, Tan LH. Biological abnormality of impaired reading is constrained by culture. *Nature* 2004; 431: 71-6.
- Snowling M. Phonemic deficits in developmental dyslexia. *Psychological Research* 1981; 43: 219-234.
- Snowling M. *Dyslexia*. Oxford: Blackwell, 2000.
- Spoehr KT, Smith EE. The role of orthographic and phonotactic rules in perceiving letter patterns. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1975; 104: 21-34.
- Sprenger-Charolles L, Cole P, Laceret P, Serniclaes W. On subtypes of developmental dyslexia: evidence from processing time and accuracy scores. *Can J Exp Psychol* 2000; 54: 87-104.
- Squire LR, Stark CE, Clark RE. The medial temporal lobe. *Annu Rev Neurosci* 2004; 27: 279-306.
- Stanners RF, Neiser JJ, Herson WP, Hall R. Memory representation for morphologically related words. *JVLVB* 1979; 18: 399-412.
- Stein J. The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia* 2001; 7: 12-36.
- Stein J. Visual motion sensitivity and reading. *Neuropsychologia* 2003; 41: 1785-93.
- Stelmack RM, Miles J. The effect of picture priming on event-related potentials of normal and disabled readers during a word recognition memory task. *J Clin Exp Neuropsychol* 1990; 12: 887-903.
- Stelmack RM, Saxe BJ, Noldy-Cullum N, Campbell KB, Armitage R. Recognition memory for words and event-related potentials: a comparison of normal and disabled readers. *J Clin Exp Neuropsychol* 1988; 10: 185-200.
- Stevens M, Grainger J. Letter visibility and the viewing position effect in visual word recognition. *Percept Psychophys* 2003; 65: 133-51.
- Stockall L, Stringfellow A, Marantz A. The precise time course of lexical activation: MEG measurements of the effects of frequency, probability, and density in lexical decision. *Brain Lang* 2004; 90: 88-94.
- Stone J, Leicester J, Sherman SM. The naso-temporal division of the monkey's retina. *J Comp Neurol* 1973; 150: 333-48.
- Suzuki K, Yamadori A. Intact verbal description of letters with diminished awareness of their forms. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2000; 68: 782-6.
- Swinney DA. Lexical access during sentence comprehension: (re)consideration of context effects. *JVLVB* 1979; 18: 645-659.
- Swinney DA, Cutler A. The access and processing of idiomatic expressions. *JVLVB* 1979; 18: 523-534.
- Taft M, Forster KI. Lexical storage and retrieval of polymorphemic and polysyllabic words. *JVLVB* 1975; 14: 638-647.
- Tagamets MA, Novick JM, Chalmers ML, Friedman RB. A parametric approach to orthographic processing in the brain: an fMRI study. *J Cogn Neurosci* 2000; 12: 281-97.

- Tallal P. Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain Lang* 1980; 9: 182-98.
- Tallal P, Miller SL, Bedi G, Byma G, Wang X, Nagarajan SS, et al. Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science* 1996; 271: 81-4.
- Tallal P, Stark RE, Mellits ED. Identification of language-impaired children on the basis of rapid perception and production skills. *Brain Lang* 1985; 25: 314-22.
- Tarkiainen A, Cornelissen PL, Salmelin R. Dynamics of visual feature analysis and object-level processing in face versus letter-string perception. *Brain* 2002; 125: 1125-36.
- Tarkiainen A, Helenius P, Hansen PC, Cornelissen PL, Salmelin R. Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain* 1999; 122 (Pt 11): 2119-32.
- Tarkiainen A, Helenius P, Salmelin R. Category-specific occipitotemporal activation during face perception in dyslexic individuals: an MEG study. *Neuroimage* 2003; 19: 1194-204.
- Taylor MJ. The role of event-related potentials in the study of normal and abnormal cognitive development. In: Boller F and Grafman J, editors. *Handbook of neuropsychology*. Vol 10. Amsterdam: Elsevier, 1995: 187-211.
- Taylor MJ. Non-spatial attentional effects on P1. *Clin Neurophysiol* 2002; 113: 1903-8.
- Taylor MJ, Keenan NK. Event-related potentials to visual and language stimuli in normal and dyslexic children. *Psychophysiology* 1990; 27: 318-27.
- Temple E, Deutsch GK, Poldrack RA, Miller SL, Tallal P, Merzenich MM, et al. Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: evidence from functional MRI. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2003; 100: 2860-5.
- Temple E, Poldrack RA, Protopapas A, Nagarajan S, Salz T, Tallal P, et al. Disruption of the neural response to rapid acoustic stimuli in dyslexia: evidence from functional MRI. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2000; 97: 13907-12.
- Temple E, Poldrack RA, Salidis J, Deutsch GK, Tallal P, Merzenich MM, et al. Disrupted neural responses to phonological and orthographic processing in dyslexic children: an fMRI study. *Neuroreport* 2001; 12: 299-307.
- Thierry G, Cardebat D, Demonet JF. Electrophysiological comparison of grammatical processing and semantic processing of single spoken nouns. *Brain Res Cogn Brain Res* 2003a; 17: 535-47.
- Thierry G, Doyon B, Demonet JF. ERP mapping in phonological and lexical semantic monitoring tasks: A study complementing previous PET results. *Neuroimage* 1998; 8: 391-408.
- Thierry G, Ibarrola D, Demonet JF, Cardebat D. Demand on verbal working memory delays haemodynamic response in the inferior prefrontal cortex. *Hum Brain Mapp* 2003b; 19: 37-46.
- Thompson-Schill SL, D'Esposito M, Aguirre GK, Farah MJ. Role of left inferior prefrontal cortex in retrieval of semantic knowledge: a reevaluation. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1997; 94: 14792-7.

-
- Townsend JT, Taylor SG, Brown DR. Lateral masking for letters with unlimited viewing time. *Percept Psychophys* 1971; 10: 375-378.
- Trauzettel-Klosinski S, Reinhard J. The vertical field border in hemianopsia and its significance for fixation and reading. *Invest Ophthalm & Visual Sc* 1998; 39: 2177-2186.
- Tulving E. Organization of memory: Quo vadis? In: Gazzaniga M, editor. *The cognitive neurosciences*. Cambridge: MIT Press, 1995: 839-847.
- Tulving E, Kapur S, Craik FI, Moscovitch M, Houle S. Hemispheric encoding/retrieval asymmetry in episodic memory: positron emission tomography findings. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1994; 91: 2016-20.
- Tyler LK, Bright P, Fletcher P, Stamatakis EA. Neural processing of nouns and verbs: the role of inflectional morphology. *Neuropsychologia* 2004; 42: 512-23.
- Valdois S, Bosse ML, ANs B, Carbonnel S, Zorman M, David D, et al. Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia: Evidence from two case studies. *Reading and Writing: An interdisciplinary Journal* 2003; 16: 541-572.
- Valdois S, Bosse ML, Tainturier MJ. The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia: review of evidence for a selective visual attentional disorder. *Dyslexia* 2004; 10: 339-63.
- Valdois S, Gérard C, Vanault P, Dugas M. Peripheral developmental dyslexia: a visual attentional account? *Cogn Neuropsychol* 1995; 12: 31-67.
- Van der Lubbe RH, Woestenburg JC. Location selection in the visual domain. *Psychophysiology* 2000; 37: 662-76.
- van Herten M, Kolk HH, Chwilla DJ. An ERP study of P600 effects elicited by semantic anomalies. *Brain Res Cogn Brain Res* 2005; 22: 241-55.
- Vandenberghe R, Nobre AC, Price CJ. The response of left temporal cortex to sentences. *J Cogn Neurosci* 2002; 14: 550-60.
- Vandenberghe R, Price C, Wise R, Josephs O, Frackowiak RS. Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures. *Nature* 1996; 383: 254-6.
- Vanier M, Caplan D. CT scan correlates of surface dyslexia. In: Patterson K, Marshall JC and Coltheart M, editors. *Surface Dyslexia*. London: Erlbaum, 1985: 511-525.
- Vitu F. The influence of reading rhythm on the optimal landing position effect. *Percept & Psychophys* 1991; 50: 58-75.
- Vitu F, O'Regan JK, Mittau M. Optimal landing position in reading isolated words and continuous texts. *Percept & Psychophys* 1990; 47: 583-600.
- Vogel EK, Luck SJ, Shapiro KL. Electrophysiological evidence for a postperceptual locus of suppression during the attentional blink. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1998; 24: 1656-74.
- Vogler GP, DeFries JC, Decker SN. Family history as an indicator of risk for reading disability. *J Learn Disabil* 1985; 18: 412-419.
- Vorobyev VA, Alho K, Medvedev SV, Pakhomov SV, Roudas MS, Rutkovskaya JM, et al. Linguistic processing in visual and modality-nonspecific brain areas: PET

- recordings during selective attention. *Brain Res Cogn Brain Res* 2004; 20: 309-22.
- Warrington EK, McCarthy RA. Categories of knowledge. Further fractionations and an attempted integration. *Brain* 1987; 110 (Pt 5): 1273-96.
- Warrington EK, McCarthy RA. Multiple meaning systems in the brain: a case for visual semantics. *Neuropsychologia* 1994; 32: 1465-73.
- Warrington EK, Shallice T. Word-form dyslexia. *Brain* 1980; 103: 99-112.
- Warrington EK, Shallice T. Category specific semantic impairments. *Brain* 1984; 107 (Pt 3): 829-54.
- Weintraub S, Mesulam MM. Developmental learning disabilities of the right hemisphere. Emotional, interpersonal, and cognitive components. *Arch Neurol* 1983; 40: 463-8.
- Werker JF, Tees RC. Speech perception in severely disabled and average reading children. *Can J Psychol* 1987; 41: 48-61.
- Wernicke C. *Der aphasische symptomkomplex*. Breslau, Poland, 1874.
- Wheeler DD. Processes in word recognition. *Cognitive Psychology* 1970; 1: 59-85.
- Wickens C, Kramer A, Vanasse L, Donchin E. Performance of concurrent tasks: a psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science* 1983; 221: 1080-2.
- Wijers AA, Lange JJ, Mulder G, Mulder LJ. An ERP study of visual spatial attention and letter target detection for isoluminant and nonisoluminant stimuli. *Psychophysiology* 1997; 34: 553-65.
- Wilson CL. Intracranial electrophysiological investigation of the human brain in patients with epilepsy: contributions to basic and clinical research. *Exp Neurol* 2004; 187: 240-5.
- Wise RJ, Greene J, Buchel C, Scott SK. Brain regions involved in articulation. *Lancet* 1999; 353: 1057-61.
- Wise RJ, Scott SK, Blank SC, Mummery CJ, Murphy K, Warburton EA. Separate neural subsystems within 'Wernicke's area'. *Brain* 2001; 124: 83-95.
- Xu B, Grafman J, Gaillard WD, Spanaki M, Ishii K, Balsamo L, et al. Neuroimaging reveals automatic speech coding during perception of written word meaning. *Neuroimage* 2002; 17: 859-70.
- Zatorre RJ, Evans AC, Meyer E, Gjedde A. Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science* 1992; 256: 846-9.
- Zatorre RJ, Meyer E, Gjedde A, Evans AC. PET studies of phonetic processing of speech: review, replication, and reanalysis. *Cereb Cortex* 1996; 6: 21-30.

ANNEXES

Annexe 1.1 : Modularité versus modèles interactifs

Deux conceptions différentes s'opposent actuellement en ce qui concerne le traitement du langage, découlant d'approches très différentes du fonctionnement de l'esprit humain :

Le postulat de modularité de Fodor

La plupart des modèles de psychologie cognitive développés à partir des années 80 sont basés de manière plus ou moins explicite sur le postulat de modularité, énoncé par Fodor en 1983 (Fodor, 1983). D'après Fodor, le système cognitif est subdivisé en sous-systèmes – ou modules – spécialisés dans le traitement d'une dimension particulière du stimulus. L'élaboration de modèles cognitifs basés sur le postulat de modularité se base sur un certain nombre de principes élémentaires : (a) chaque module est autonome en terme de ressources cognitives ; (b) chaque module est spécifique d'un domaine cognitif particulier ; (c) le traitement modulaire est automatique et inconscient ; (d) les processus de chaque module sont innés ; (e) chaque module est associé à un système neural structuré, spécifique et localisé. En ce qui concerne plus spécifiquement la capacité cognitive du langage, Fodor propose que la faculté de langage constitue un

module périphérique, indépendant des systèmes centraux. Étroitement spécialisé dans le traitement des données verbales, ce système est imperméable à tout autre type d'information (contextuelle, attentes du sujet, connaissances générales...) et à tout contrôle central. Son fonctionnement est, de ce fait, rapide et irrépressible. Ce module reçoit à l'entrée le produit de l'analyse acoustique ou visuelle et fournit à la sortie la forme linguistique de l'énoncé, toute interprétation nécessaire étant ensuite prise en charge par les systèmes centraux. D'après un des fondements de son postulat, les principes de fonctionnement de ce système sont innés – idée reprise de Chomsky que la faculté de langage est biologiquement déterminée.

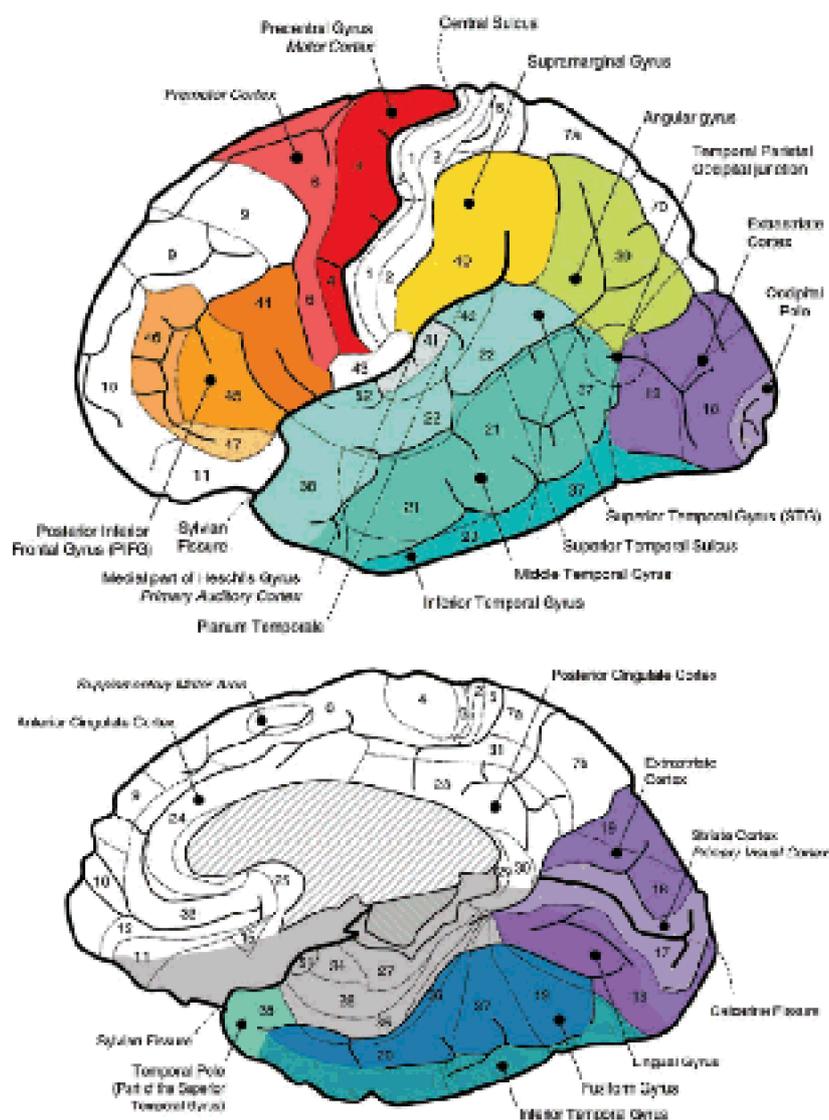
La principale critique faite à Fodor est que son postulat implique une coupure radicale entre les aspects purement linguistiques, et les aspects extra-linguistiques du traitement, que les données empiriques ne justifient pas (voir (Marslen-Wilson, 1987) pour une discussion). Les données expérimentales semblent indiquer une modularité partielle de certains niveaux de traitement, qui n'exclut pas, dans certains cas, leur perméabilité à certaines informations de niveau supérieur.

Les modèles interactifs (connexionnisme)

Les modèles connexionnistes se sont développés notamment à partir des travaux de McClelland, Rumelhart et al. (voir (McClelland and Elman, 1986; McClelland and Rumelhart, 1981)). Au lieu d'un traitement séquentiel, le fonctionnement cognitif est conçu comme celui d'un très grand nombre de processeurs élémentaires, constituant un réseau hautement interconnecté, et fonctionnant de façon massivement parallèle (principe des modèles PDP, *Parallel Distributed Processing*). Ce type de modèle présente un certain nombre de propriétés intéressantes : (a) un nombre important de contraintes diverses est pris en compte, simultanément ; (b) le jeu des excitations et inhibitions entre les éléments du réseau rend compte de l'interactivité des processus – sans exclure certains effets de modularité partielle ; (c) la capacité à traiter des données incomplètes ou déviantes, ainsi que les processus d'apprentissage sont pris en compte dans ce type de modèle. L'approche connexionniste constitue surtout un cadre descriptif très général, qui jusqu'ici a été utilisé plutôt pour rendre compte de résultats expérimentaux – la plupart des travaux publiés sont des simulations – bien qu'elle connaisse actuellement un développement important.

Mais les modèles connexionnistes sont tout de même critiqués, surtout du fait de leur incompatibilité avec les substrats neurobiologiques. Ces modèles, même s'ils prennent en compte de nombreux facteurs et expliquent une majorité de résultats expérimentaux, ne peuvent souvent pas être adaptés aux connaissances biologiques que nous avons du cerveau humain.

Annexe 1.2 : Principales régions cérébrales impliquées dans le langage



Principales régions cérébrales impliquées dans le langage. Haut : vue latérale de l'hémisphère gauche d'un cerveau humain standard. Bas : vue sagittale médiale de l'hémisphère droit. Les aires de Brodmann (BA) sont indiquées par leur numérotation respective. (D'après (Demonet et al., 2005)).

Classification des aires corticales en fonction de leur caractère histologique (cytoarchitectonique) et fonctionnel

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

1, 2, 3	Cortex sensitif primaire	Gyrus postcentral	Sensibilité
4	Cortex moteur primaire	Gyrus précentral	Motricité
5	Aire associative pariétale postérieure	Gyrus pariétal supérieur	Stéréognosie
6	Aire prémotrice et motrice supplémentaire	Gyrus précentral et cortex adjacent rostral	Programmation des mouvements
7	Aire associative pariétale postérieure	Gyrus pariétal supérieur	Visuomotricité, perception
8	Champs oculomoteur frontal	Gyrus frontal supérieur et moyen, face interne	Saccades
9 -12	Cortex associatif préfrontal	Gyrus frontal supérieur et moyen, face interne	Aires cognitives, programmation du mouvement
13 - 16	Aires Végétatives	Cortex insulaire	
17	Aire visuelle primaire	Scissure calcarine	Vision
18	Aire visuelle secondaire	Autour de l'aire 17	-
19	Aire visuelle tertiaire	Autour de l'aire 18	-
20	Aire visuelle inférotemporale	Gyrus temporal inférieur	Reconnaissance des formes
21	Aire visuelle inférotemporale	Gyrus temporal moyen	Reconnaissance des formes
22	Aire auditive associative	Gyrus temporal supérieur	Audition
23-27	Cortex associatif limbique	Cortex subcalleux, cingulaire, retrosplénial, parahippocampique	Emotion, mémoire
28	Cortex olfactif , cortex associatif limbique	Gyrus parahippocampique	Olfaction, émotions
29-33	Cortex associatif limbique	Gyrus cingulaire et rétrosplénial	Emotions
34-36	Cortex olfactif , cortex associatif limbique	Gyrus parahippocampique	Odeurs, émotions
37	Cortex associatif pariéto temporo occipital, aire visuelle temporale moyenne	Gyrus temporal moyen et inférieur (jonction T-O)	Perception, vision, lecture, langage
38	Cortex olfactif , cortex associatif limbique	Pole temporal	Odeurs, émotions
39	Cortex associatif T P O	Carrefour temporo pariéto occipital (gyrus angulaire)	Perception, vision, lecture, langage
40	Cortex associatif T P O	Carrefour temporo pariéto occipital (gyrus supramarginal)	Perception, vision, lecture, langage

41-42	Cortex auditif primaire	Gyrus de Heschl et temporal supérieur	Audition
43	Cortex olfactif ?	Cortex insulaire, opercule fronto pariétal	Goût
44	Aire de Broca, cortex prémoteur latéral	Gyrus frontal inférieur (opercule frontal)	Langage, planification du mouvement
45	Cortex associatif préfrontal	Gyrus frontal inférieur	
46	Cortex associatif préfrontal	Gyrus frontal moyen	
47	gyrus frontal inférieur	Gyrus frontal inférieur	

Annexe 4.1 : Liste des stimuli utilisés dans l'étude des effets "Top-down" lexicaux (présentée au chapitre 4)

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

position de la lettre cible	mots	lettre cible	lettre alternative	non-mots	lettre cible	lettre alternative
1	crier	c	t	pgsrf	p	c
1	ville	v	b	afqwm	a	i
1	reste	r	p	ewthv	e	o
1	ligne	l	v	erjnl	e	a
1	mieux	m	p	cxzgh	c	m
1	belle	b	c	ukfcn	u	e
1	libre	l	v	bgtpu	b	n
1	moins	m	c	mltvs	m	g
2	prier	r	l	srzwm	r	l
2	mille	i	a	qixhv	i	a
2	force	o	a	zlfvn	l	r
2	vieux	i	o	knhtd	n	s
2	lutte	u	a	qrthb	r	i
2	moral	o	u	kewdz	e	a
2	riche	i	o	xiztc	i	e
2	vague	a	o	qeznj	e	a
3	lèvre	v	p	rkopb	o	a
3	prise	i	o	htled	l	r
3	corps	r	u	jfthw	t	l
3	salon	l	v	hgmcp	m	u
3	entre	t	c	dqnjk	n	l
3	faute	u	i	lmpvf	p	r
3	livre	v	t	jdmrz	m	c
3	sorte	r	u	dzgtc	g	b
4	rouge	g	t	sxmub	u	i
4	forme	m	g	rzbnq	n	v
4	parmi	m	d	rtwud	u	a
4	parti	t	o	zpkag	a	o
4	boire	r	t	gpvtn	t	u
4	doute	t	v	fdxih	i	o
4	monde	d	t	bskig	i	l
4	poète	t	m	wlxaj	a	o
5	cours	s	t	dzqxe	e	o
5	écrit	t	n	kljqe	e	u
5	finir	r	e	dfmgu	u	t
5	perdu	u	s	qzbwe	e	a
5	point	t	g	hljze	e	o
5	porte	e	s	cfgbu	u	i
5	quant	t	d	pkvbt	t	u
5	temps	s	o	gvfln	n	s

Annexe 5.1 : Liste des stimuli utilisés dans l'étude des effets "Top-down" attentionnels (présentée chapitre 5)

Effets "Top-down" lexicaux et attentionnels sur la reconnaissance de mots isolés en modalité visuelle.

MOTS	PSEUDO-MOTS		MOTS	PSEUDO-MOTS
ACIER	PCTER		INDICE	PNDICE
ACTEUR	AETEUR		LIONNE	LRONNE
ANGLE	AEGLE		LISTE	IUSTE
APPUI	AOPUI		MAGIE	MRGIE
ARDEUR	AODEUR		MALICE	MTLICE
ATOME	PEBME		MARDI	MEADI
AUDACE	AEDACE		MARQUE	AERQUE
BAGAGE	AOGAGE		MENACE	MNRACE
BASSIN	BECSIN		MERITE	MAEITE
BERGER	BABGER		METAUX	MAEAUX
BIBLE	BETLE		MINUIT	MTSUIT
BONNET	BACNET		NARINE	NEAINE
BONTE	EANTE		NEVEU	NSVEU
BUSTE	QESTE		NUANCE	NESNCE
CAHIER	CBNIER		PARDON	AERDON
CANAL	ELNAL		PERIL	PTRIL
CARNET	CJRNET		PLAQUE	LEAQUE
CIGARE	CMGARE		PRETE	PUETE
CLIENT	CAIENT		PUDEUR	QEDEUR
COMMIS	OCMAIS		RACINE	REAINE
CONGE	CESGE		RECU	RTCUL
COPIE	CFPIE		RENARD	EONARD
DEBRIS	UANRIS		RESEAU	RTSEAU
DECRET	DAERET		REVEIL	RDVEIL
DEDAIN	EARAIN		REVERS	RBVERS
DELICE	DRLICE		RIVAGE	RVIAGE
DELIRE	DBLIRE		RUELLE	REJLLE
DEMON	DAEON		RUINE	RERNE
DETOUR	DAEOUR		SAISIE	SJISIE
DURETE	DEUETE		SEANCE	SEBNCE
ECART	BCART		SEJOUR	SUEOUR
ELITE	EARTE		SIGNAL	SGINAL
EMPLOI	EAMLOI		SOUPIR	SICPIR
ENFER	EOFER		STATUE	TIATUE
EPOUSE	DUOUSE		SUCRE	SFURE
ESTIME	CSTIME		TEMPLE	TURPLE
FABLE	FEALE		TIRANT	TPRANT
FIRME	IURME		TRACE	REDCE
FOSSE	FUOSE		VALET	VDLET
FUREUR	FLREUR		VESTON	VUETON