

Université de Montréal

**LE RÔLE DE LA SIMILARITÉ VISUELLE DES LETTRES DANS LA DYSLEXIE
LETTRE-PAR-LETTRE**

par Daniel Fiset

Faculté des arts et des sciences

Département de psychologie

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.) en psychologie
option neuropsychologie clinique

Décembre, 2003

© Daniel Fiset, 2003



BF
22
U54
2004
V.019

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

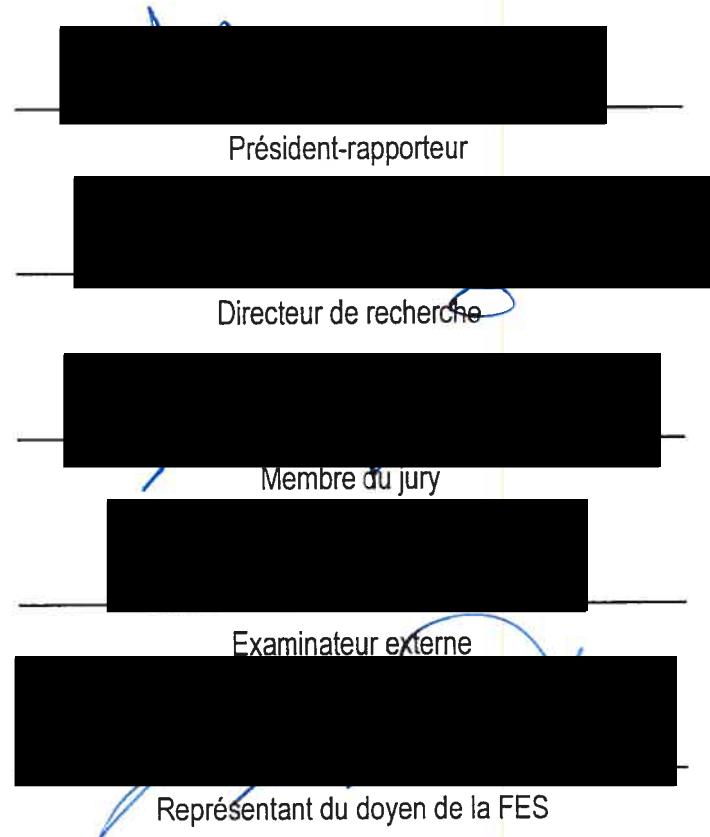
Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée:

**LE RÔLE DE LA SIMILARITÉ VISUELLE DES LETTRES
DANS LA DYSLEXIE LETTRE-PAR-LETTRE**

présentée par Daniel Fiset

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes:



RÉSUMÉ

Plusieurs études suggèrent que les lecteurs adultes sont capables de reconnaître les lettres d'un mot en parallèle. Une lésion des aires temporo-occipitales de l'hémisphère gauche peut toutefois altérer cette capacité. Le trouble qui en résulte, appelé dyslexie lettre-par-lettre, est caractérisé par une augmentation exagérée des temps de lecture en fonction du nombre de lettres dans le stimulus. Cet effet de longueur de mot est habituellement interprété comme la preuve d'une lecture exclusivement séquentielle chez les dyslexiques lettre-par-lettre.

Deux questions majeures sont à la base de cette thèse. 1- Pourquoi le traitement en parallèle des lettres est-il inefficace chez ces patients? 2 - Quelle est la fonction de la stratégie lettre-par-lettre dans cette dyslexie?

Dans le premier article, nous avons montré que LH, un patient dyslexique lettre-par-lettre, présentait des effets de haut-niveau (voisinage phonographique, fréquence lexicale et imageabilité) en lecture à voix haute de mots isolés. Nous avons ensuite démontré que ces trois effets étaient présents lorsque toutes les lettres étaient présentées simultanément mais qu'ils étaient absents lorsque la présentation se faisait une lettre à la fois de gauche à droite. Ce résultat suggère un lien étroit entre la capacité à traiter toutes les lettres d'un mot simultanément (i.e. traitement en parallèle des lettres) et les effets de haut-niveau susmentionnés. Enfin, nous avons montré que ces effets de haut-niveau étaient présents pour des mots constitués de lettres de basse confusibilité (la confusibilité d'une lettre consiste en sa similarité visuelle avec les autres lettres de l'alphabet) mais absents pour des mots dont les lettres sont de haute confusibilité. Cela suggère que la probabilité d'un traitement en parallèle des lettres est

modulée, chez LH, par la confusabilité des lettres des mots. La dernière expérience (exp. 4) démontre que la présentation séquentielle élimine l'effet de confusabilité suggérant ainsi que le but de la stratégie lettre-par-lettre est d'éviter de confondre les lettres visuellement similaires et d'augmenter le ratio signal/bruit nécessaire à l'identification explicite des mots.

Lors du deuxième article, nous avons montré que la confusabilité des lettres pouvait expliquer de façon parcimonieuse l'effet de longueur de mot diagnostique de la dyslexie lettre-par-lettre. Lors de la première expérience, nous avons montré, chez sept patients dyslexiques lettre-par-lettre, que l'effet de longueur de mot pouvait être éliminé si les mots de différentes longueurs étaient appariés sur la somme de la confusabilité des lettres du mot. Trois expériences sont ensuite rapportées qui montrent que la performance des sept patients dans l'expérience 1 reflète réellement un traitement en parallèle des lettres. Ces résultats suggèrent donc que les performances de lecture explicite chez les patients dyslexiques ne sont pas uniquement modulées par la stratégie lettre-par-lettre mais également par les capacités résiduelles de traitement en parallèle des lettres.

L'ensemble des résultats contenus dans cette thèse démontre que le trouble des patients dyslexiques se situe au niveau de l'encodage en parallèle des lettres d'un mot et plus spécifiquement au niveau de la discrimination des lettres visuellement similaires.

MOTS CLÉS:

Alexie pure, Dyslexie, Lecture, Reconnaissance des lettres, Reconnaissance des mots, Traitement visuel.

ABSTRACT

Letter-by-letter (LBL) dyslexia is an acquired reading disorder caused by left occipital lobe lesions. The hallmark of this dyslexia is the word length effect: naming latencies increase monotonically with the number of letters in the word. This is generally interpreted as indicating that word recognition in LBL dyslexia depends on the sequential identification of individual letters.

In this thesis, we examined two critical issues regarding LBL dyslexia: 1- what is the nature of the functional impairment that forces sequential letter processing for overt word recognition? 2- What is the purpose of the sequential letter-by-letter reading strategy?

In the first article, four experiments focussing on these issues were conducted in LH, an LBL dyslexic. Exp. 1 showed facilitatory effects of increased phonographic neighbourhood size, lexical frequency, and imageability on the word naming performance of LH. These high-order effects reflect a modulation of parallel letter processing in LH and demonstrate that he is able to rapidly access phonological, lexical and semantic knowledge during reading. Congruently, Exp. 2 demonstrated that all three high-order effects are eliminated when words are presented one letter at a time, from left to right. Exp. 3 showed that these high-level effects are abolished if target words are made of letters that are highly confusable (i.e. visually similar) to other letters of the alphabet. These observations suggest that LBL dyslexia may rest on an impairment at the letter encoding level that causes an excessive level of background noise in the activation of higher-order representations (i.e. letter combinations) when letters are processed in parallel. An additional experiment (exp. 4) shows that the letter confusability effect is also eliminated when words are presented one letter at a time, from left to right. This latter finding suggests that

compensatory sequential processing invoked by LBL dyslexics serves to avoid the confusion between visually similar letters which is present with parallel letter processing, and to amplify the signal-to-noise ratio required to achieve overt word identification.

In the second article, we show, in seven LBL patients, that the diagnostic word length effect can be eliminated if words of different lengths are matched on the sum of the confusability of their constituent letters. Three additional experiments are reported which demonstrate that the reading performance of LBL patients in these conditions truly reflects parallel letter processing. These findings demonstrate that explicit word recognition does not always require sequential letter encoding in LBL dyslexia.

Taken as a whole, this thesis demonstrates that the trouble with LBL patients is at the level of the parallel encoding of letters in a word and, more specifically, at the level of the discrimination of visually similar letters.

KEYWORDS:

Dyslexia, Letter recognition, Pure alexia, Reading, Visual processing, Word recognition.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	III
ABSTRACT.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES ABBRÉVIATIONS.....	XII
REMERCIEMENTS.....	XIII
CHAPITRE PREMIER : INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
TRAITEMENT EN PARALLÈLE DES LETTRES EN LECTURE NORMALE.....	5
TRAITEMENT PARALLÈLE VS. SÉRIEL : LES MODÈLES COGNITIFS.....	12
LA DYSLEXIE LETTRE-PAR-LETTRE.....	18
Survol historique et localisation anatomique.....	18
Interprétation cognitive de l'alexie pure/dyslexie lettre-par-lettre.....	22
Trouble de la forme visuelle du mot (word form system).....	23
Trouble de la reconnaissance des lettres.....	26
Trouble perceptif général.....	23
Trouble fonctionnel dans la dyslexie lettre-par-lettre.....	33
UN DÉFICIT DU TRAITEMENT EN PARALLÈLE DES LETTRES.....	34
CHAPITRE DEUXIÈME : ARTICLE PREMIER.....	37
The breakdown of parallel letter processing in letter-by-letter dyslexia.....	38
ABSTRACT.....	39
INTRODUCTION.....	40
CASE REPORT.....	44

WORD LENGTH EFFECT.....	45
EXPERIMENTAL STUDY.....	49
GENERAL DISCUSSION.....	68
CONCLUSION.....	73
FOOTNOTES.....	75
ACKNOWLEDGEMENTS.....	76
REFERENCES.....	77
TABLE.....	87
FIGURES.....	89
CHAPITRE TROISIÈME : ARTICLE DEUXIÈME.....	95
Letter-by-letter dyslexia: The word length effect revisited.....	96
ABSTRACT.....	97
INTRODUCTION.....	98
RESULT.....	101
DISCUSSION.....	104
METHODS.....	107
ACKNOWLEDGEMENTS.....	110
REFERENCES.....	111
TABLE.....	115
FIGURES LEGENDS.....	116
FIGURES.....	118
CHAPITRE QUATRIÈME : DISCUSSION GÉNÉRAL.....	121
Article 1.....	122
Article 2.....	126
Dyslexie lettre-par-lettre ou dyslexie de confusabilité ?.....	130

UN MODÈLE DE LA DYSLEXIE LETTRE-PAR-LETTRE.....	133
Modèle neuro-anatomique de Cohen et al. (2003).....	134
Études psychophysiques de la lecture.....	135
Notre modèle.....	136
Perspectives futures.....	138
CHAPITRE CINQUIÈME : CONCLUSION.....	141
RÉFÉRENCES GÉNÉRALES.....	143

LISTE DES TABLEAUX**CHAPITRE DEUXIÈME****TABLE 1**

Reaction times (in msec) for LH and the normal control subjects in the naming and lexical decision tasks as a function of word length.....	87
--	----

CHAPITRE TROISIÈME**TABLE 1**

Short description of our seven LBL patients. This table contains the magnitude of the diagnostic word length effect, the confusability effect and the localisation of the lesion for each patient. See the cited published articles for more details.....	115
---	-----

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE PREMIER

Figure 1	Modèle modulaire de la lecture.....	14
Figure 2	Modèle connexioniste triangulaire.....	17

CHAPITRE DEUXIÈME

Figure 1	Average correct response times (msec) in LH and b) in young neurologically intact readers as a function of the PhN size and letter confusability (Exp. 2a).....	89
Figure 2	Average correct response times (msec) in LH and b) in young neurologically intact readers as a function of lexical frequency and letter confusability (Exp. 2b).....	91
Figure 3	Average correct response times (msec) in LH and b) in young neurologically intact readers as a function of imageability and letter confusability (Exp. 2c).....	93

CHAPITRE TROISIÈME

Figure 1	Average RTs for the group of patients in Exp. 1.....	118
Figure 2	Average RTs across all patients in Exp. 3.....	119
Figure 3	Average RTs across all patients in Exp. 4.....	120

CHAPITRE QUATRIÈME

Figure 1	Exemple de stimulus utilisé dans l'expérience de bruit positionnel.....	129
----------	---	-----

LISTE DES ABVRÉVIATIONS

Exp. = Expérience

HD = Hémisphère droit.

HG = Hémisphère gauche

IRMf = Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.

LBL = Letter-by-letter

ms = millisecond

msec = millisecond

N = neighbours

PDP = Parallel and distributed processing

PhN = Phonographic neighbours

PON = Pure orthographic neighbours

RT = Reaction time

SFVM = Système de la forme visuelle des mots

TR = Temps de réaction

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche : le professeur Martin Arguin pour ses conseils et commentaires pertinents ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de mes études doctorales. Je tiens également à remercier certaines personnes qui ont été sources d'inspiration tout au long de ces études, qui m'ont permis de me développer comme jeune chercheur et surtout qui m'ont transmis leur passion pour les neurosciences cognitives : Alain Content, Daniel Bub et Isabelle Peretz. Un merci tout spécial à Frédéric Gosselin pour son amitié, son aide précieuse, son esprit de contradiction etc.

Je remercie tous mes collègues du GRENEC que j'ai eu l'occasion de rencontrer tout au long de mes études. Je remercie plus particulièrement mes amis (es) du laboratoire Arguin. En premier lieu, Stéphanie Fiset, Sophie Lecours et Daniel Saumier avec lesquels j'ai passé des moments plus qu'agréables en début de thèse. Ensuite, les nouveaux, Éric McCabe et Caroline Blais qui ont rendu cette fin de thèse extrêmement plaisante par leur motivation exceptionnelle et leurs encouragements perpétuels.

Des remerciements spéciaux à mes ami(e)s de toujours Yannick Bouchard et Sophie Dell'Aniello. J'adresse également une reconnaissance toute particulière à mes parents et ma famille qui m'ont toujours supporté et encouragé malgré la longueur de ces études et les hauts et les bas inhérents à toute thèse de doctorat.

CHAPITRE PREMIER

Introduction générale

Depuis déjà quelques millénaires, les humains ont compris l'avantage de pouvoir communiquer à l'aide d'autres systèmes que le langage oral. L'un de ces systèmes (i.e. le système orthographique) occupe aujourd'hui une place tellement importante que son acquisition et son maintien sont essentiels au bon fonctionnement de tout individu dans notre société. Par exemple, la capacité de lire nous permet d'établir des interactions avec l'environnement (e.g. trouver son chemin dans une nouvelle ville, sortir de l'argent d'un guichet électronique, etc.) et de maintenir des contacts avec nos proches (e.g. les courriels).

D'un point de vue cognitif, la lecture exige la transformation d'un signal visuel en représentations langagières. Le système neuronal impliqué dans la reconnaissance visuelle des mots peut, au moins en partie, être décrit comme un système hiérarchique. Comme première étape, la lecture nécessite la capacité de reconnaître visuellement les symboles qui composent les mots écrits. Par exemple, la lecture de l'anglais nécessite la reconnaissance de 52 symboles (26 lettres minuscules et 26 majuscules) alors que la lecture du français exige, en plus, la reconnaissance de diacritiques comme les accents et la cédille. La reconnaissance des lettres est une condition essentielle à la reconnaissance des mots (Pelli, Farell & Moore, 2003) mais ne constitue en rien une finalité. En fait, la reconnaissance des lettres permet de reconnaître le mot comme une entité propre (ce que certains chercheurs appellent la forme visuelle du mot ; voir McCandliss, Cohen & Dehaene, 2003 pour une revue de la littérature), mais également de le prononcer et de le comprendre. La lecture implique donc, en plus de la reconnaissance des lettres, au moins trois autres domaines de connaissances, soit l'orthographe, la phonologie et la sémantique. Selon un nombre croissant de chercheurs, c'est l'interaction entre ces domaines qui permettrait la reconnaissance des mots écrits et la lecture (voir Harm, 1998 ; Harm & Seidenberg, 2001, sous

presse ; Plaut, McClelland, Seidenberg & Patterson, 1996 ; Seidenberg & McClelland, 1989 ; Stone & Van Orden, 1990 pour des modèles connexionistes élaborant l'idée de trois domaines de connaissance en interaction).

La capacité à activer les connaissances sur l'orthographe, la phonologie et la sémantique est donc nécessaire à la lecture des mots. Certains troubles visuels ainsi que certaines lésions cérébrales peuvent cependant altérer notre capacité à lire de façon habile et efficace. Lorsqu'une lésion au cerveau occasionne des difficultés de lecture chez un sujet auparavant normo-lecteur, on parle de dyslexie acquise (Coltheart, Patterson, & Marshall, 1980 ; Patterson, Marshall & Coltheart, 1985). La dyslexie n'est pas une entité unique et différentes lésions peuvent causer des formes variées de dyslexie (Black & Behrmann, 1994). Par exemple, un trouble de la phonologie résultera habituellement en une dyslexie phonologique, c'est-à-dire une difficulté à prononcer correctement un mot nouveau ou un non-mot prononçable (pseudo-mot) comme *chabidula* (Beauvois & Derouesné, 1979; Derouesné & Beauvois, 1979; Farah, Stowe & Levinson, 1996 ; Harm & Seidenberg, 2001). Par ailleurs, selon certaines théories, si la sémantique est atteinte, il en résultera des erreurs de régularisation en lecture de mots irréguliers (par exemple *femme* et *monsieur* seraient lus /fɔmə/ et /mɔ̃siœR/, respectivement). Ces patients appelés dyslexiques de surface ont été décrits pour la première fois par Marshall et Newcombe en 1973.

D'un point de vue anatomique, les régions lésées communes aux 16 dyslexiques phonologiques décrits par Roeltgen (1983) sont la région frontale médiane gauche, la région péri-sylvienne gauche autour de l'insula, le gyrus temporal moyen supérieur gauche et la région occipitale inféro-latérale gauche. Pour sa part, la dyslexie de surface impliquerait les régions des gyri temporaux

supérieur et médian de l'hémisphère gauche et la substance blanche sous-jacente (Black & Behrmann, 1994).

Comme nous venons de le voir, différents systèmes cognitifs et cérébraux peuvent être endommagés et engendrer des troubles de la lecture particuliers. Dans les deux dyslexies décrites ci-haut, le trouble se situe après l'acquisition de la forme visuelle du mot (Shallice, 1988). Ainsi, les patients atteints demeurent capables de reconnaître les lettres avec facilité et la difficulté se limite souvent à un seul type de stimuli. Par exemple, les dyslexiques de surface éprouvent des difficultés avec les mots irréguliers mais lisent correctement les mots réguliers et les pseudo-mots alors que les dyslexiques phonologiques ont des problèmes avec les pseudo-mots mais lisent adéquatement tous les mots, qu'ils soient réguliers ou irréguliers. Ce n'est donc pas la capacité de créer une représentation orthographique qui est affectée chez ces patients, mais plutôt la capacité d'utiliser (ou d'activer) un domaine de connaissance particulier.

D'autres patients peuvent toutefois éprouver d'importantes difficultés de lecture et ce, malgré des connaissances orthographiques, phonologiques et sémantiques intactes. Par exemple, une lésion des aires temporo-occipitales de l'hémisphère gauche (Binder & Mohr, 1992 ; Damasio & Damasio, 1983) peut créer des difficultés de lecture et ce, malgré des capacités normales à épeler les mots (orthographe), à les prononcer (phonologie) et à en donner une définition exacte (sémantique). En 1892, Dejerine fut le premier à décrire un tel patient (Monsieur C) (voir Bub, Arguin & Lecours, 1993; Hanley & Kay, 2003). L'évaluation neurologique de ce patient montrait des capacités normales de langage oral ainsi qu'une écriture dans les limites de la norme. Néanmoins, la lésion cérébrale avait fortement altéré les capacités de lecture du patient. Ainsi,

Monsieur C éprouvait des difficultés très marquées à reconnaître les lettres de l'alphabet et ne pouvait lire aucun mot, même parmi les plus fréquents. Toutefois, tous les patients alexiques purs ne sont pas aussi touchés que le patient de Dejerine. Par exemple, certains patients ayant une lésion hémisphérique gauche similaire mais souvent moins extensive et épargnant les projections calleuses provenant de l'hémisphère droit (Binder & Mohr, 1992) sont capables de lire grâce à une stratégie compensatoire lettre-par-lettre. Cette stratégie est évidente quand le patient nomme à voix haute chacune des lettres avant de prononcer le mot. Dans d'autres cas, toutefois, la stratégie lettre-par-lettre doit être inférée grâce à l'observation d'un ralentissement important de la lecture (l'identification d'un mot de trois lettres peut demander entre une et 17 secondes) associé à un effet de longueur de mot anormalement élevé (plus de 300 ms pour chaque lettre additionnelle dans un mot). C'est ce type de patient qui intéresse la présente thèse.

Trois sections suivront. Dans la première section, nous allons décrire les appuis empiriques qui suggèrent que la lecture s'effectue grâce au traitement en parallèle des lettres chez le lecteur habile. Dans la seconde section, nous allons faire un bref survol historique de l'alexie pure (ou dyslexie lettre-par-lettre), des connaissances sur les lésions anatomiques qui lui sont typiquement associées et des théories fonctionnelles de cette dyslexie. Dans la troisième section, nous poserons trois questions qui serviront de tremplin aux articles faisant partie de la thèse.

TRAITEMENT EN PARALLÈLE DES LETTRES EN LECTURE NORMALE

Chez les sujets normaux, la reconnaissance des mots écrits est effectuée grâce au traitement en parallèle des lettres tant que le stimulus orthographique est orienté horizontalement (Ellis, Young & Anderson, 1988). L'hypothèse que la reconnaissance des lettres d'un mot puisse se faire en

parallèle implique que les mots de différentes longueurs devraient être reconnus à la même vitesse. Dans une revue de littérature effectuée par Henderson en 1982, l'amplitude des effets de longueur de mot se situait entre 6 et 63 ms par lettre. Une étude effectuée par Schiepers (1980) avait toutefois montré que les effets de longueur pouvaient être complètement éliminés si l'ensemble du mot était présenté à la fovéa. Ce résultat expérimental suggère que la présence d'un effet de longueur de mot, même petit, pourrait être reliée à la qualité de l'input visuel. Quand une partie du mot est perçue en vision périphérique, où la résolution spatiale est inférieure (Teller, 1990), un effet de longueur de mot apparaît. Ces résultats suggèrent que les sujets normaux sont capables de lire les mots grâce au traitement en parallèle des lettres à condition que les lettres du mot soient présentées sous des conditions optimales. En vision centrale, des données récentes montrent d'ailleurs que le système perceptif est capable de traiter jusqu'à 6 lettres en parallèle avant qu'un petit effet de longueur de mot ne survienne (Cohen et al., 2003 ; Lavidor & Ellis, 2002 ; Weekes, 1997).

L'absence d'effet de longueur de mot chez les lecteurs habiles a mené plusieurs chercheurs à conclure que la lecture se faisait grâce au traitement en parallèle des lettres. Ce résultat n'est cependant pas la seule démonstration empirique suggérant un traitement en parallèle des lettres chez les sujets normaux. En fait, les résultats obtenus dans de nombreux paradigmes expérimentaux suggèrent la présence d'un traitement rapide et en parallèle des lettres.

Parmi ces paradigmes, on retrouve celui développé par Reicher (1969) et Wheeler (1970) pour l'étude de l'effet de supériorité du mot. Ces auteurs ont démontré que la reconnaissance des lettres à l'intérieur d'un mot connu (ex. livre) est supérieure à la reconnaissance des mêmes

lettres à l'intérieur d'un pseudo-mot (ex. viler). De plus, une étude menée par Johnson (1975) montre que la détection d'un mot se fait aussi rapidement que celle d'une seule lettre. Comme le soulignent Massaro et Klitzke (1977), ce résultat implique l'existence d'un traitement rapide et en parallèle des lettres dans le mot. En fait, la détection d'un mot (plusieurs lettres) dans un temps aussi court que la détection d'une seule lettre implique l'existence d'un système parallèle dont la performance n'est que peu ou pas touchée par le nombre de symboles à traiter simultanément.

Les travaux ayant utilisé une présentation séquentielle lettre par lettre sont également utiles relativement à l'implication d'un traitement en parallèle des lettres chez les lecteurs habiles. Une étude effectuée par Travers (1974) où les mots étaient présentés soit lettre par lettre, soit digramme par digramme (i.e. paire de lettres) ou trigramme par trigramme (i.e. triplet de lettres) a montré que la lecture augmentait en efficacité avec la taille des groupements de lettres. De plus, et c'est un résultat extrêmement important, les mots sont aussi bien reconnus quand les lettres apparaissaient dans un ordre aléatoire que dans l'ordre habituel de gauche à droite. Une autre étude effectuée par Mewhort et Beal (1977) a manipulé la vitesse de présentation des lettres lorsque ces dernières étaient présentées une à une, de gauche à droite. Lorsque la vitesse de présentation était très rapide (intervalle inter-lettre de 50 ms), la performance des sujets était bonne ce qui implique que, dans ces conditions, les sujets normaux sont capables d'intégrer en parallèle chacune des lettres. Lorsque les auteurs ont diminué une première fois la vitesse de présentation (intervalle inter-lettre de 125 ms), la performance s'est clairement détériorée. Par contre, la performance est redevenue bonne lorsque la vitesse de présentation fut diminuée une seconde fois (intervalle inter-lettre de 250 ms). Les auteurs ont conclu que la vitesse de présentation la plus lente a permis la reconnaissance des lettres une à une. Cette stratégie serait

toutefois difficile voire impossible à la vitesse supérieure. Puisque la reconnaissance des mots est extrêmement rapide, il est peu probable que la reconnaissance séquentielle des lettres en soit le mécanisme de base.

L'absence d'effet de longueur de mot chez les sujets normaux demeure probablement la preuve la plus convaincante d'un traitement en parallèle des lettres en lecture. La présence/absence d'un effet de longueur de mot serait toutefois modulée par la qualité perceptive du stimulus. Des recherches dans le domaine des différences inter-hémisphériques indiquent que c'est l'hémisphère gauche qui est responsable de ce traitement en parallèle des lettres. En effet, les mots présentés dans le champ visuel droit (hémisphère gauche) sont lus plus rapidement et présentent un plus faible taux d'erreurs que les mots présentés dans le champ visuel gauche (hémisphère droit). De plus, une interaction robuste et significative est retrouvée entre le nombre de lettres dans le mot et l'hémichamp visuel dans lequel celui-ci est présenté (Bub & Lewine, 1988; Ellis, Young & Anderson, 1988; Lavidor, Ellis & Pansky, 2002 Lavidor, Ellis, Shillcock & Bland, 2001; Lindell, Nicholls & Castles, 2002 ; Young & Ellis, 1985). Cette interaction reflète le fait que la performance de l'hémisphère droit diminue (i.e. augmentation des temps de réaction et des taux d'erreurs) à mesure que le nombre de lettres augmente dans le mot alors que la performance de l'hémisphère gauche ne serait que peu ou pas affectée par le nombre de lettres.

Pour expliquer les différences hémisphériques, Ellis, Young et Anderson (1988) ont proposé l'existence de deux modes de traitement des séquences de lettres: le Mode A et le Mode B. Le Mode A constitue une route privilégiée vers le lexique visuel. Les lettres y sont traitées en parallèle et la performance n'est donc pas affectée par la longueur du mot. Ce mode est

disponible uniquement dans l'hémisphère gauche et ne peut traiter que les mots présentés en format conventionnel (e.g., mots orientés horizontalement, en minuscules ou en majuscules). Au contraire, la performance pour les mots traités par le Mode B est affectée par le nombre de lettres, ce qui suggère un traitement séquentiel des lettres. Ce mode de traitement sériel est disponible dans les deux hémisphères. Selon Ellis et al. (1988), le Mode B caractérise le traitement des mots et des pseudo-mots présentés dans le champ visuel gauche de même que le traitement des pseudo-mots et des mots dont le format est altéré qui sont présentés dans le champ visuel droit.

Une autre théorie, celle-ci proposée par Marsolek, Kosslyn et Squire (1992) (voir également Burgund & Marsolek, 1997; Dehaene et al., 2001 ; Marsolek, 1995; Marsolek & Hudson, 1999 ; Marsolek, Schacter & Nicolas, 1996), suggère l'existence de deux systèmes encodant la forme visuelle des mots. Le premier encoderait la forme spécifique du mot, préserverait les caractéristiques précises (e.g. la police et la casse des lettres) et serait plus efficace dans l'hémisphère droit. Au contraire, le second système encoderait la forme abstraite des mots et spécifierait uniquement l'identité des mots et des lettres et non leur forme visuelle. Ce système serait plus efficace dans l'hémisphère gauche (Marsolek, 1995; Marsolek & Hudson, 1999).

Les deux hypothèses décrites ci-haut prédisent des résultats opposés en ce qui a trait à l'effet de l'alternance de casse (e.g. PoMmE) sur les performances de lecture des deux hémisphères. En effet, l'hypothèse des deux modes de traitement de Ellis et al. (1988) suggère que l'alternance de casse nuirait davantage à l'hémisphère gauche qu'au droit alors que l'hypothèse de Marsolek et al. (1992) prédit exactement l'inverse. Les résultats de S. Fiset et Arguin (1999) et de Lavidor,

Ellis et Pansky (2002) appuient l'hypothèse des deux modes de traitement de Ellis et collaborateurs. En effet, le premier groupe d'auteurs a montré que l'alternance avait un effet délétère plus important sur l'hémisphère gauche que sur l'hémisphère droit alors que les travaux de Lavidor et al. (2002) démontrent qu'un effet de longueur de mot significatif apparaît lorsque des mots dont la forme visuelle a été altérée sont présentés à l'hémisphère gauche.

Les résultats rapportés ci-haut suggèrent donc que deux conditions sont nécessaires pour observer un traitement des lettres en parallèle (i.e. absence d'effet de longueur de mot) chez les sujets normaux : un stimulus visuel de qualité et de format standard ainsi que la projection du mot vers l'hémisphère gauche (voir toutefois Jordan, Patching & Thomas, 2003). D'autres facteurs importants sont suggérés par l'étude de Weekes (1997). L'auteur a démontré l'importance de la fréquence lexicale dans l'utilisation efficace du traitement en parallèle des lettres. Les résultats suggèrent qu'une absence d'effet de longueur de mot peut aisément s'obtenir chez des sujets normaux tant que la sélection des items est restreinte aux mots de haute fréquence lexicale. En fait, l'utilisation de ce type de mot permet même de ne pas contrôler d'autres variables telles que le nombre de voisins orthographiques (les mots pouvant être créés à partir d'un mot cible en changeant une seule lettre : par exemple, mais et bain sont voisins orthographiques de main ; Coltheart, Davelaar, Jonasson, & Besner, 1977) et l'imageabilité des mots. Cependant, dans ces mêmes conditions (lorsque le nombre de voisins orthographiques n'est pas contrôlé), la performance en lecture de mots de basse fréquence montre un effet de longueur significatif. La fréquence lexicale aurait donc un rôle important à jouer dans la reconnaissance en parallèle des lettres.

Dans une autre expérience, Weekes (1997) a démontré l'importance de contrôler le nombre de voisins orthographiques lorsque des mots de basse fréquence sont utilisés. Dans l'article, l'auteur souligne tout d'abord que le nombre de voisins orthographiques est positivement corrélé avec le nombre de lettres dans un mot. Puisque les mots courts ont en moyenne plus de voisins orthographiques que les mots longs (en anglais les mots de 4 lettres ont en moyenne 11 voisins orthographiques alors que les mots de 7 lettres en ont un seul, Arguin, S. Fiset & Bub, 2002) et qu'un grand nombre de voisins orthographiques entraîne une réduction des temps de lecture, le fait de ne pas contrôler cette dernière variable pourrait causer un effet de longueur de mot artéfactuel. Les résultats de Weekes appuient cette hypothèse. En effet, l'effet de longueur de mot significatif obtenu pour les mots de basse fréquence disparaît complètement si les mots de différentes longueurs sont appariés quant au nombre de voisins orthographiques. Ce dernier facteur apparaît donc avoir une contribution importante dans la capacité des lecteurs normaux à reconnaître les mots de basse fréquence par un traitement en parallèle. Une bonne compréhension des mécanismes en jeu dans l'effet du voisinage orthographique semble donc déterminante pour comprendre le rôle de cette variable dans la présence/absence de l'effet de longueur de mot (voir Arguin & Bub, 1996, Arguin, Bub & Bowers, 1998 ; Arguin, S. Fiset & Bub, 2002 ; Montant & Behrmann, 2001 pour des démonstrations d'un effet du voisinage orthographique dans la dyslexie lettre-par-lettre et des discussions quant à ses implications).

Une étude de Peereman et Content (1997) est ici particulièrement informative. Ces auteurs ont démontré que l'effet du nombre de voisins orthographiques en dénomination de mots écrits n'était pas seulement dû à des mécanismes orthographiques (comme le suggérait Andrews, 1989, 1992, 1997) mais plutôt à l'interaction entre les connaissances orthographiques et phonologiques. Ces

auteurs ont en effet démontré que l'effet facilitateur du nombre de voisins orthographiques était restreint à un type de voisins orthographiques : les voisins phonographiques (voisins orthographiques qui sont également voisins phonologiques de la cible ; les voisins phonologiques sont des mots pouvant être créés à partir d'un mot cible en changeant un seul phonème). Pour en venir à cette conclusion, ils ont comparé l'effet de deux types de voisins orthographiques, soit les voisins orthographiques purs (voisins orthographiques qui ne sont pas voisins phonologiques) et les voisins phonographiques. Seuls ces derniers ont donné lieu à un effet facilitateur, c'est-à-dire une diminution significative des temps de réaction et des taux d'erreurs en lecture de pseudo-mots isolés lorsque le nombre de voisins est augmenté. Puisque l'effet facilitateur des voisins orthographiques implique l'activation des connaissances phonologiques, on peut donc suggérer que les stimuli ayant la capacité d'activer les connaissances phonologiques auront davantage de chances d'être lus grâce au traitement en parallèle des lettres.

TRAITEMENT PARALLÈLE VS. SÉRIEL : LES MODÈLES COGNITIFS

Les modèles théoriques de la lecture ont eu une influence extrêmement importante au cours des dernières années. Ils ont fortement influencé les expériences effectuées tant chez le lecteur normal que chez les dyslexiques, les interprétations qui en ont découlé, ainsi que nos explications des différentes dyslexies acquises (voir D. Fiset & Arguin, 2002 pour une revue des écrits).

Les modèles cognitifs actuels admettent l'existence d'un traitement en parallèle des lettres chez les lecteurs adultes habiles. Selon le type de modèle théorique toutefois, le traitement en parallèle peut être utilisé soit sur tous les types de stimuli orthographiques, qu'ils soient des mots ou des pseudo-mots (cf. modèles PDP, McClelland & Rumelhart, 1981 ; Seidenberg & McClelland, 1989 ;

Plaut, McClelland, Seidenberg & Patterson, 1996 ; Harm & Seidenberg, sous presse), soit uniquement sur certains mots ayant une fréquence lexicale élevée ou une forte valence sémantique (e.g. imageabilité ; cf. modèle modulaire DRC, Coltheart, Curtis, Atkins & Haller, 1993; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001). Nous allons maintenant décrire de façon plus exhaustive les conditions nécessaires au traitement en parallèle des lettres selon ces deux modèles théoriques.

Le modèle modulaire de la lecture proposé par Coltheart et coll. (1993 ; 2001, voir figure 1) propose que la probabilité d'une lecture en parallèle est plus forte pour les mots de haute fréquence lexicale ou ayant une forte valence d'imagerie (i.e. imageabilité). Ce modèle suggère que la reconnaissance des stimuli orthographiques est effectuée par deux voies de traitement distinctes agissant en parallèle. La première arrivant à une interprétation du stimulus donne la réponse. Dans ce modèle, la voie lexicale traite les lettres d'un mot en parallèle alors que la voie sous-lexicale traite les lettres de façon séquentielle de gauche à droite. Puisque ce modèle implique une course entre les deux voies, tout facteur expérimental accélérant la reconnaissance des mots améliorera par ce fait même la probabilité d'une victoire de la voie lexicale et donc du traitement en parallèle. Par exemple, plus un mot est fréquent plus il y aurait de chance que son identification repose sur la voie lexicale (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001). La valence d'imagerie aurait également un effet positif sur la probabilité de traitement en parallèle puisque le système sémantique peut contribuer à la reconnaissance orthographique par rétroaction, augmentant ainsi la vitesse de reconnaissance d'un mot par la voie lexicale. Donc, dans ce modèle, les mots ayant une forte fréquence lexicale et/ou une forte imageabilité sont

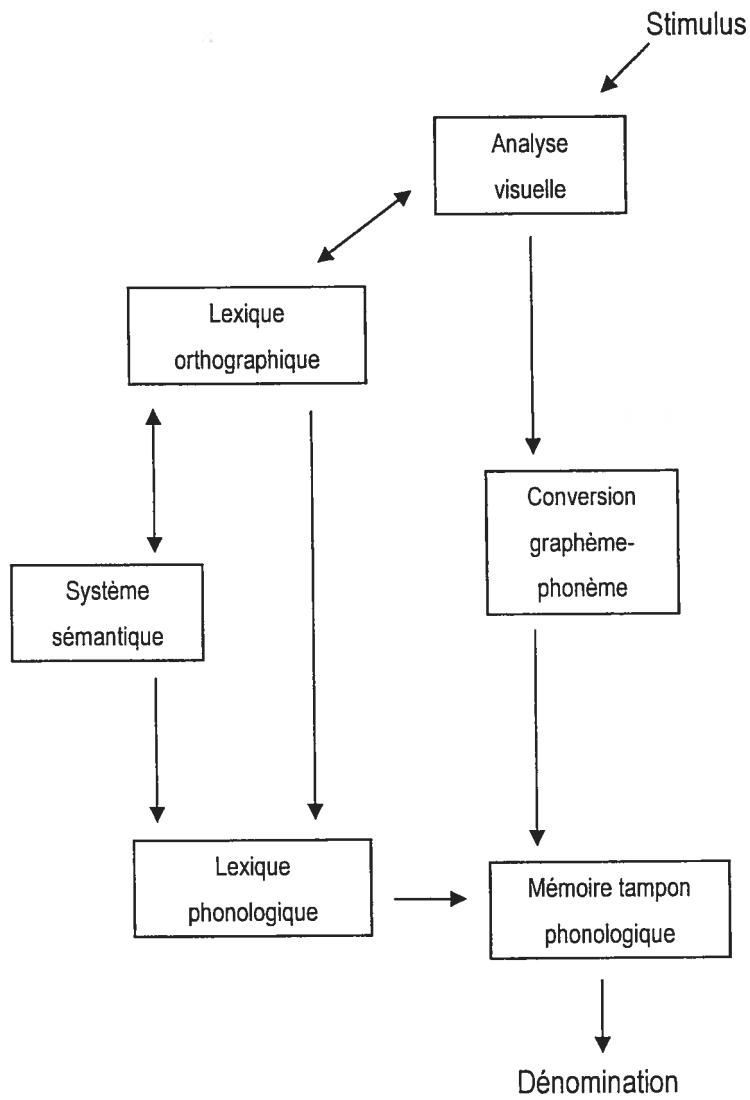


Figure 1 : Modèle modulaire de la lecture

rapidement reconnus grâce à la voie lexicale alors que les mots peu fréquents ainsi que les pseudo-mots sont reconnus grâce à la voie non lexicale.

Une étude menée par Content et Peereman (1992) apporte des arguments en faveur d'une distinction du mode de traitement (parallèle vs. sériel) selon la lexicalité (mot vs. pseudo-mot) du stimulus. Ces auteurs observent que l'effet de longueur de mot est présent tant pour les mots de haute que de basse fréquence si la liste de stimuli contient des pseudo-mots. Par contre, quand les stimuli sont présentés en blocs distincts selon leur lexicalité (seulement des mots ou seulement des pseudo-mots), seuls les mots de basse fréquence (et les pseudo-mots) présentent un effet de longueur. Ce résultat suggère que, dans un contexte de lecture normal (i.e. uniquement des mots), les mots de haute fréquence sont habituellement lus en parallèle alors que les mots de basse fréquence seraient davantage soumis à un mode de traitement sériel. Comme nous l'avons vu plus haut toutefois, une étude plus récente de Weekes (1997) a montré que l'effet de longueur obtenu par Content et Peereman pour les mots de basse fréquence (1992) pourrait s'expliquer par le manque de contrôle du nombre de voisins orthographiques pour les mots de différentes longueurs. À l'opposé, l'effet de longueur obtenu avec des pseudo-mots serait résistant à ce contrôle du voisinage orthographique, suggérant ainsi une intervention obligatoire de la voie sous-lexicale (Rastle & Coltheart, 1998 ; Weekes, 1997).

À première vue, il semble que le modèle triangulaire proposé par Seidenberg et McClelland (1989, voir figure 2) soit incapable d'expliquer le contraste observé par Peereman et Content (1992) entre les mots de haute et de basse fréquence lexicale ainsi que l'observation d'un effet de longueur de pseudo-mots résistant au contrôle du nombre de voisins orthographiques démontré

par Weekes (1997). En effet, ces résultats suggèrent, comme le propose le modèle modulaire, que le statut lexical des séquences de lettres module leur capacité à éliciter un traitement en parallèle des lettres. Le modèle triangulaire se fonde sur les postulats suivants : 1) tous les stimuli orthographiques sont reconnus grâce au traitement en parallèle des lettres et 2) des mécanismes cognitifs communs régissent la reconnaissance des stimuli, quel que soit leur statut lexical, sémantique ou phonologique (voir Plaut, McClelland, Seidenberg & Patterson, 1996 ; Seidenberg & McClelland, 1989 ; Harm & Seidenberg, sous presse). Dans le contexte d'un tel modèle, le simple fait de concevoir la reconnaissance en parallèle des lettres comme étant dépendante d'un mécanisme à capacité limitée permet de rendre compte avec parcimonie des résultats décrits précédemment. Ainsi, dans le modèle triangulaire, la reconnaissance des lettres est effectuée par le module orthographique (ou graphémique). Lorsque les lettres d'un mot sont traitées par ce module, l'activation se propage en parallèle vers les modules phonologique et sémantique. Selon ce modèle, la dénomination d'un mot sera effectuée par la voie de conversion orthographe à phonologie alors que la voie secondaire sémantique (orthographe à sémantique à phonologie) viendra en aide à la voie principale seulement lorsqu'un mot difficile est rencontré (e.g. un mot dont la correspondance écrit-à-oral est irrégulière) (Harm, 1998 ; Harm & Seidenberg, sous presse ; Plaut, McClelland, Seidenberg & Patterson, 1996 ; Strain, Patterson & Seidenberg, 1995). Une autre propriété extrêmement importante de ce type de modèle est la présence d'attracteurs sémantiques (Hinton & Shallice, 1991 ; Plaut & Shallice, 1993) et phonologiques (Plaut, Seidenberg, McClelland & Patterson, 1996). Le rôle de ces attracteurs est d'abaisser les exigences du système quant à la précision de l'input orthographique direct reçu par les modules phonologique et sémantique. Donc si, par exemple, la voie de conversion orthographe à sémantique est imprécise étant donné un manque d'acuité visuelle, la présence d'attracteurs

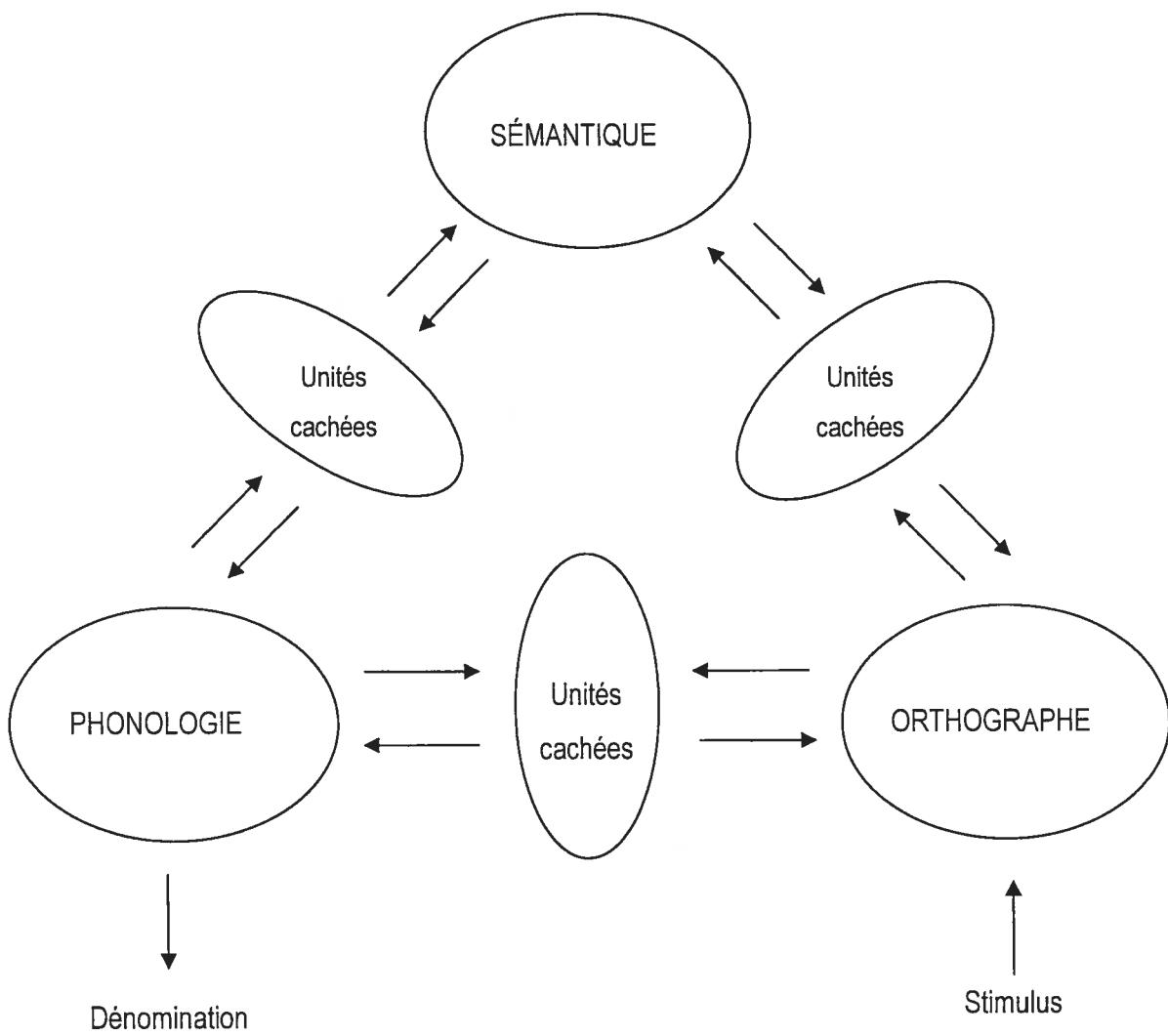


Figure 2 : Modèle connexioniste triangulaire

sémantiques permettra d'améliorer la qualité du signal neural et de reconnaître le stimulus malgré tout. Tous les mots n'ont toutefois pas la même capacité à activer ces attracteurs. Par exemple, certains mots fortement imageables (ou concrets) activent plus facilement les attracteurs sémantiques, ce qui diminue les exigences en termes de qualité visuelle de l'input orthographique relativement aux mots peu imageables (mots abstraits). Les mots fréquents activeraient également avec facilité les connaissances sémantiques et phonologiques, faisant ainsi que le traitement de ces mots bénéficie de l'action des attracteurs. Il est également possible que les mots ayant de nombreux voisins phonographiques activent mieux les attracteurs phonologiques que les mots ayant peu de voisins, ce qui limiterait la nécessité d'un input visuel de qualité et augmenterait la probabilité de reconnaître le mot rapidement et en parallèle.

Selon le modèle triangulaire, le mélange de mots et de pseudo-mots dans la première expérience de Peereman et Content (1992) augmente la propension du système à n'utiliser que les voies directes sans faire appel aux attracteurs phonologiques et sémantiques. Lorsque seuls des mots sont présents, le système utiliserait davantage ses connaissances de haut niveau, limitant ainsi l'effet de longueur aux mots de basse fréquence (Peereman et Content, 1992) ou même uniquement aux pseudo-mots (Weekes, 1997).

LA DYSLEXIE LETTRE-PAR-LETTRE

Survol historique et localisation anatomique

Le neurologue français Jules Dejerine a été le premier à décrire un cas d'alexie sans agraphie. Le patient, Monsieur C, à la suite d'une première lésion de l'hémisphère gauche (objectivée au niveau comportemental par la présence d'une légère hémiplégie droite) montrait une

reconnaissance extrêmement altérée des caractères alphanumériques de sorte que la lecture des mots était impossible alors que celle des lettres était difficile et empreinte de très fréquentes erreurs. La lecture des nombres était quant à elle difficile et effectuée chiffre par chiffre. Une évaluation ophtalmologique montra que les difficultés de lecture de Monsieur C ne pouvaient ni s'expliquer par une baisse de l'acuité visuelle ni par une difficulté générale de reconnaissance visuelle puisque la reconnaissance des visages et des objets se faisait sans encombre. Quelques mois plus tard, un second accident vasculaire cérébral fit apparaître une agraphie chez le patient. Celui-ci décéda quelques jours plus tard (le 16 janvier 1892). Suite à l'autopsie, Dejerine présenta le patient à la Société Biologique de Paris en février 1892 comme le premier cas de cécité verbale pure (les auteurs utilisent aujourd'hui les termes alexie sans agraphie, alexie pure ou dyslexie lettre-par-lettre ; nous allons pour notre part utiliser les termes alexie pure et dyslexie lettre-par-lettre). Les lésions cérébrales démontrées par l'autopsie étaient particulièrement informatives en ce qui a trait aux régions anatomiques impliquées dans la lecture. Dejerine objectiva une lésion récente du gyrus angulaire gauche associée à l'agraphie de Monsieur C à la fin de sa vie. Les régions touchées au moment du premier accident cérébral étaient également toutes situées dans l'hémisphère gauche. Ces régions comprenaient le lobe lingual, le gyrus fusiforme, le cunéus, la pointe du lobe occipital ainsi que le corps calleux. Ces observations ont permis à Dejerine de localiser les « images optiques des lettres » au niveau du gyrus angulaire. Ces images seraient nécessaires tant pour la lecture que pour l'écriture. Une lésion de cette région créerait donc une alexie avec agraphie. Par contre, une lésion empêchant l'information visuelle des deux hémisphères de se rendre au gyrus angulaire créerait une alexie pure, c'est-à-dire un trouble de lecture sans difficulté d'écriture et d'épellation.

En 1965, le célèbre neurologue Geshwind proposa une interprétation anatomique extrêmement similaire à celle de Dejerine. Comme Bub, Arguin et Lecours (1993) le suggèrent, le seul changement significatif apporté par Geshwind à la théorie de Dejerine est l'importance accordée à la lésion du corps calleux. En effet, selon Geshwind, cette dernière lésion déconnecte les aires visuelles de l'hémisphère droit du gyrus angulaire, nécessaire à la reconnaissance des mots. Les études plus récentes sur l'étiologie anatomique de l'alexie pure diminuent toutefois sensiblement l'importance de la lésion du splénium du corps calleux. Plusieurs auteurs ont en effet décrit des patients avec alexie pure sans lésion calleuse (Damasio & Damasio, 1983; De Renzi, Zambolin & Cris, 1987; Greenblatt, 1983). Dans une étude anatomique importante, Damasio et Damasio (1983) pointent la substance blanche péri-ventriculaire gauche comme le site lésionnel déterminant de l'alexie pure. Une lésion à ce niveau aurait la capacité d'empêcher l'information visuelle provenant des deux hémisphères d'atteindre le gyrus angulaire gauche. Dans une étude portant sur 16 patients ayant subi un infarctus de l'artère cérébrale postérieure gauche, De Renzi, Zambolin et Crisi (1987) suggèrent l'implication du gyrus lingual dans les troubles de lecture rencontrés par ces patients. Dans une étude similaire portant sur 17 patients, Binder et Mohr (1992) observent que l'alexie avec compensation stratégique lettre-par-lettre survient à la suite d'une lésion extensive du lobe temporal ventral. Cette localisation est congruente avec celle observée par les autres auteurs. Une des contributions importantes de ces auteurs a également été d'observer la présence d'une lésion calleuse chez tous les patients atteints d'une alexie globale (incapacité sévère dans la reconnaissance des mots et des lettres).

Il semble donc qu'une lésion des aires temporo-occipitales de l'hémisphère gauche touchant plus spécifiquement la substance blanche sous-jacente soit nécessaire et suffisante pour produire une

dyslexie lettre-par-lettre. Les patients touchés par ce type de lésion seraient donc capables d'utiliser une stratégie compensatoire lettre-par-lettre pour identifier les mots explicitement. Par ailleurs, la présence d'une lésion du splénium du corps calleux serait nécessaire pour créer une alexie globale. Encore aujourd'hui, plusieurs auteurs sont en accord avec les idées énoncées ci-haut (voir par exemple Hanley & Kay, 2003). Par contre, certains chercheurs (Benito-Leon, Sanchez-Suarez, Diaz-Guzman et Martinez-Salio, 1997; Cohen et al., 2003) suggèrent que la dyslexie lettre-par-lettre surviendrait non pas suite à une déconnexion visuo-angulaire, mais serait causée par une lésion touchant une région anatomique nécessaire à la reconnaissance des stimuli orthographiques ou plus spécifiquement à l'encodage de la forme visuelle des mots. Nous allons plus tard décrire une théorie fonctionnelle de l'alexie proposant une hypothèse similaire (Cohen et al., 2003; Warrington et Shallice, 1980).

Il demeure possible que les deux explications anatomiques décrites plus haut ne soient pas mutuellement exclusives. Ainsi, certains patients pourraient présenter un syndrome de déconnexion alors que d'autres pourraient avoir perdu leurs connaissances sur la forme visuelle des mots. D'un point de vue fonctionnel toutefois, la théorie de déconnexion demeure peu explicite quant aux mécanismes cognitifs perturbés (Arguin & Bub, 1993; Farah & Wallace, 1991; Patterson & Kay, 1982) alors que la théorie de la forme visuelle des mots suggère la présence d'un trouble exclusivement orthographique, ce qui ne fait présentement pas l'unanimité parmi les chercheurs (e.g. Behrmann, Plaut & Nelson, 1998). Dans la prochaine section, nous allons nous intéresser aux théories cognitives (fonctionnelles) ayant tenté d'expliquer la dyslexie lettre-par-lettre.

Interprétation cognitive de l'alexie pure/dyslexie lettre-par-lettre

La neuropsychologie cognitive s'est intéressée aux dyslexies acquises au début des années 1970 (Marshall & Newcombe, 1973). Marshall & Newcombe (1973) ainsi que leurs contemporains se sont intéressés non pas aux bases neurobiologiques de la dyslexie, mais plutôt à la nature des fonctions cognitives endommagées. Dans le domaine de la dyslexie lettre-par-lettre, la majorité des auteurs admettent que le trouble touche la capacité des patients à reconnaître les lettres d'un mot en parallèle. Ces patients doivent donc recourir à une stratégie de lecture lettre-par-lettre pour identifier les mots. La localisation fonctionnelle du déficit demeure toutefois sujette à controverse. Les propositions théoriques actuelles peuvent généralement être regroupées sous deux bannières distinctes. Le premier groupe suggère l'existence d'un trouble spécifique aux stimuli orthographiques. Dans ce groupe, le trouble toucherait soit la reconnaissance des lettres (Arguin & Bub, 1993, soumis; Arguin, Fiset & Bub, 2002; Behrmann & Shallice, 1995; Miozzo & Caramazza, 1998; Perri, Bartolomeo & Silveri, 1996), soit le système de la forme visuelle des mots (Warrington & Shallice, 1980; Warrington & Langdon, 1994, 2002; Cohen et al., 2003). Le deuxième groupe, par contre, propose que la dyslexie lettre-par-lettre découle d'un trouble perceptif général touchant plus spécifiquement les stimuli orthographiques mais dont les répercussions peuvent être démontrées pour tous les stimuli visuels (Behrmann, Plaut & Nelson, 1998; Behrmann, Nelson & Sekuler, 1998; Farah & Wallace, 1991; Friedman & Alexander, 1984; Mycroft, Behrmann & Kay, soumis; Sekuler & Behrmann, 1996). Nous allons maintenant revoir les démonstrations empiriques sous-jacentes à chacune des théories de la dyslexie lettre-par-lettre.

Trouble de la forme visuelle du mot (word form system)

Au début des années 80, Warrington et Shallice (1980) ont évalué les fonctions visuelles ainsi que la reconnaissance des lettres du patient RAV et ont conclu que ces deux pré-requis à l'identification des mots étaient suffisamment bien préservés chez leur patient pour ne pas nuire à la lecture. Ils ont par la suite observé que ce même patient éprouvait davantage de difficultés à lire les mots écrits en lettres attachées que ceux en caractères d'imprimerie. Les auteurs ont alors tenté de comprendre la différence entre ces deux formats. Ils ont conclu que les lettres étaient difficilement identifiables dans les mots écrits en lettres attachées et que la lecture se basait alors sur la forme visuelle du mot. Par contre, l'identification des mots en lettres détachées se ferait à partir de l'identification des lettres, fonction qui est relativement bien préservée chez RAV. Les auteurs (voir également Warrington & Langdon, 1994, 2002) ont donc émis l'hypothèse que la dyslexie lettre-par-lettre serait causée par une lésion au niveau du système de la forme visuelle des mots (SFVM).

Selon Warrington et Shallice (1980), le SFVM est un module sous-lexical dont le rôle est de diviser les suites de lettres en unités visuelles familières (graphèmes, syllabes, morphèmes, mots entiers) pour pouvoir ensuite les catégoriser selon leur statut lexical. Récemment, Cohen, Dehaene et collaborateurs (Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002; McCandliss, Cohen & Dehaene, 2003) ont localisé le SFVM au niveau du gyrus fusiforme de l'hémisphère gauche. Leurs études effectuées en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) montrent que cette région serait davantage activée pour les suites de lettres que pour d'autres types de stimuli spatialement complexes (e.g. des damiers). Leurs travaux démontrent également que le gyrus fusiforme est davantage activé pour les pseudo-mots (non-mots prononçables) que pour les

mots et également plus activé pour les mots que pour les non-mots imprononçables (Cohen et al., 2002). L'analyse fonctionnelle du SFVM par ces auteurs diffère cependant de celle offerte par Warrington et Shallice. Ainsi, Dehaene, Le Clef'H, Poline, Le Bihan et Cohen (2002) suggèrent que le rôle du SFVM serait de produire une représentation structurale invariante du mot. Cette représentation pré-lexicale serait formée d'une séquence ordonnée d'identités orthographiques abstraites (où A = a) invariantes pour la taille, la police et la casse (voir Polk & Farah, 2002 pour une idée similaire). De plus, Cohen et al. (2002) ajoutent que le SFVM encoderait les régularités orthographiques, ce qui expliquerait sa faible activation avec les non-mots.

Comme Warrington et Shallice (1980), Cohen et al. (2003) ont proposé une théorie de la dyslexie lettre-par-lettre où la difficulté se situerait au niveau du SFVM. Leurs conclusions sont entre autres basées sur la localisation des lésions de patients dyslexiques. Ainsi, tous les patients dyslexiques auraient des lésions touchant soit directement le gyrus fusiforme (voir Beversdorf, Ratcliffe, Rhodes & Reeves, 1997 ainsi que Cohen et al., 2003 pour des patients ayant une lésion de cette aire qui épargne toutefois la substance blanche sous-jacente), soit les faisceaux de substances blanches amenant l'information visuelle vers le gyrus fusiforme.

Les observations anatomiques结构ales et fonctionnelles de Cohen et al. (2002, 2002) sont extrêmement intéressantes en ce qui a trait à l'intervention possible du gyrus fusiforme dans la lecture et dans la dyslexie lettre-par-lettre. Le rôle fonctionnel du gyrus fusiforme dans la lecture normale demeure toutefois nébuleux. Par exemple, des données provenant de ce laboratoire (Cohen et al., 2003) révèlent une activation plus forte du gyrus fusiforme lors de la présentation de non-mots par rapport à la présentation de mots familiers, résultat clairement contradictoire par

rappor t à l'hypothèse de Cohen et al. (2000, 2002) à l'effet que cette région encoderait les régularités orthographiques (voir également Dehaene et al., 2002). Selon les auteurs, cette différence d'activation proviendrait de disparités expérimentales entre les études. Par exemple, Cohen et al. (2000, 2002) présentaient les stimuli de façon latéralisée et ce, pendant seulement 200 ms alors que Cohen et al. (2003) présentaient les stimuli au point de fixation pendant 1700 ms. Il est possible, par exemple, que l'identification des lettres des non-mots était trop difficile dans l'étude de Cohen et al. (2000, 2002), expliquant ainsi le manque d'activation du gyrus fusiforme. Cette hypothèse suggère que le gyrus fusiforme serait activé uniquement lorsque suffisamment de lettres sont reconnues pour l'identification de la cible et que cette région anatomique jouerait un rôle dans la reconnaissance des lettres. Polk et al. (2002; voir également Steimgrimsson et al., 2003) suggèrent une conclusion similaire, où le gyrus fusiforme jouerait un rôle d'expert dans la reconnaissance visuelle des lettres. Polk et al. (2002) ont comparé l'activation en IRMf obtenue lors de la présentation de lettres et de chiffres. Les résultats indiquent que la présentation de lettres active significativement plus le gyrus fusiforme que les chiffres, ce qui amène les auteurs à conclure que cette région est spécialisée dans la reconnaissance des lettres.

Revenons sur l'hypothèse d'un trouble du SFVM dans la dyslexie lettre-par-lettre. Un des corollaires de cette hypothèse est que la lecture chez les dyslexiques lettre-par-lettre serait impossible parce qu'une étape précoce de l'encodage visuel des mots est atteinte. La lecture ne pourrait donc pas reposer sur les mécanismes habituels mais dépendrait plutôt de l'application d'une stratégie compensatoire. Selon Warrington et Shallice (1980), cette stratégie consiste à épeler le mot à voix haute ou dans sa tête pour ensuite utiliser les connaissances

orthographiques de sortie, utiles pour l'épellation ou l'écriture. La présentation d'un patient dyslexique lettre-par-lettre (Rapcsak, Rubens et Laguna, 1990) faisant peu d'erreurs en lecture mais dont les performances en épellation suggèrent un profil de dysorthographie de surface (difficultés sévères à écrire les mots irréguliers par rapport aux mots réguliers) diminue toutefois la plausibilité de l'hypothèse d'épellation inversée proposée par Warrington et Shallice (1980). En effet, si le lexique orthographique de sortie, utile pour l'épellation, (voir le modèle modulaire de Ellis et Young, 1996) était utilisé pour lire, les performances de lecture des patients dyslexiques lettre-par-lettre devraient toujours présenter les mêmes caractéristiques que leur performance en épellation, ce qui n'est pas le cas du patient étudié par Rapcsak et al. (1990).

Afin d'expliquer la stratégie compensatoire lettre-par-lettre, Cohen et al. (2003) suggèrent plutôt l'existence d'un SFVM localisé dans l'hémisphère droit. Ce système n'aurait aucun rôle dans la lecture normale mais serait activé lors du ré-apprentissage de la lecture par les patients dyslexiques. L'information visuelle provenant de l'hémisphère droit transiterait donc par ce SFVM droit pour ensuite atteindre les régions phonologiques et sémantiques de l'hémisphère gauche par des connexions calleuses intactes. L'hémisphère droit serait toutefois incapable de traiter les lettres en parallèle et fournirait un input sériel, lettre-par-lettre à l'hémisphère du langage (voir Ellis & Young, 1988; Lavidor & Ellis, 2002 pour une suggestion similaire quant aux capacités de l'hémisphère droit en reconnaissance des mots chez le lecteur normal).

Trouble de la reconnaissance des lettres

De nombreux lecteurs lettre-par-lettre éprouvent des problèmes dans le traitement visuel des lettres même si ces dernières sont présentées de façon isolée (Behrmann, Plaut & Nelson, 1998).

Dans l'une des premières études utilisant l'approche cognitive dans le domaine de la dyslexie lettre-par-lettre, Patterson & Kay (1982) ont observé que deux de leurs patients, MW et CH, réussissaient toujours à identifier un mot si les lettres constitutantes étaient correctement reconnues. Ces auteurs ont par la suite fait une analyse minutieuse des erreurs et montré que l'identification d'un sous-ensemble de lettres semblait particulièrement problématique chez leurs patients. Ils ont enfin observé un lien entre les problèmes d'identification de lettres chez les patients dyslexiques et la matrice de similarité visuelle des lettres obtenue par Bouma (1971) chez des sujets normaux. Ces résultats suggèrent que les problèmes d'identification de lettres dans la dyslexie lettre-par-lettre soient reliés à la similarité visuelle entre une lettre cible et les autres lettres de l'alphabet. En fait, les réponses erronées données par les patients de Patterson et Kay (1982) avaient presque toutes une similarité visuelle forte avec les cibles (voir également Perri, Bartolomeo & Silveri, 1996). Les auteurs mentionnent également avoir eu l'impression que leurs patients éprouvaient davantage de difficultés en identification de lettres dans un mot qu'individuellement. À notre connaissance toutefois, aucune étude n'a exploré le lien entre la similarité visuelle des lettres, la difficulté particulière à traiter plusieurs lettres simultanément (comme dans un mot) et la dyslexie lettre-par-lettre avant les travaux récents de Arguin, S. Fiset et Bub (2002) ainsi que ceux présentés dans cette thèse.

Dans un article récent, Arguin, S. Fiset et Bub (2002) ont effectué une analyse détaillée des performances de lecture du patient dyslexique IH selon les variables nombre de lettres, confusabilité des lettres (similarité visuelle entre une lettre cible et les autres lettres de l'alphabet) et nombre de voisins orthographiques d'un mot cible. Les résultats des expériences 3 et 4 sont particulièrement importants. Dans l'expérience 3, les auteurs montrent chez IH des effets de

longueur de mot et de confusabilité de lettres (IH lit systématiquement plus lentement les mots dont les lettres sont de haute confusabilité) significatifs mais indépendants (i.e. additifs, voir Sternberg, 1969). Les mécanismes responsables de l'effet de longueur de mot semblaient donc indépendants de ceux responsables de l'effet de confusabilité des lettres. Les auteurs proposent donc deux mécanismes indépendants : l'utilisation d'une stratégie lettre-par-lettre (séquentielle) expliquerait l'émergence d'un effet de longueur de mot chez IH alors qu'une tentative d'utiliser le traitement en parallèle des lettres résulterait en un effet important de la confusabilité des lettres. Cette hypothèse suggère donc qu'une interaction devrait être obtenue entre l'effet de confusabilité des lettres et toutes variables reliées au traitement en parallèle des lettres. Les résultats de l'expérience 4 sont conformes à cette prédiction. Ainsi, les résultats indiquent que l'effet du nombre de voisins orthographiques est modulé par la variable confusabilité des lettres. Lorsque la confusabilité moyenne d'un mot (addition de la confusabilité de chaque lettre divisée par le nombre de lettres dans le mot) est basse, IH montre un effet important du voisinage orthographique (une variable que les auteurs relient au traitement en parallèle des lettres). Par contre, lorsque la confusabilité moyenne est élevée, l'effet du nombre de voisins orthographiques disparaît complètement. IH semble donc incapable de traiter en parallèle les mots ayant une forte confusabilité de lettres, impliquant que seul le mode sériel de traitement détermine ses performances de lecture dans ce cas.

Plusieurs auteurs ont également proposé qu'une difficulté liée au traitement des lettres soit à l'origine de la dyslexie lettre-par-lettre. La difficulté proposée par plusieurs (Kay & Hanley, 1991; Bowers, Arguin & Bub, 1996) fait toutefois intervenir l'hypothèse que la lecture passe obligatoirement par la reconnaissance des lettres à un niveau abstrait (où A = a). Bowers, Arguin

& Bub (1996) ont, par exemple, montré lors d'une expérience d'amorçage de lettres que le patient IH montrait un effet d'amorçage pour les lettres visuellement identiques mais aucun effet d'amorçage abstrait (e.g. amorce = A; cible = a). Kay et Hanley (1991) ont également proposé une hypothèse similaire. Elles ont demandé à un dyslexique d'effectuer une tâche d'appariement pareil/différent sur des lettres présentées soit simultanément, soit séquentiellement. La décision pouvait soit être prise sur la base des caractéristiques visuelles (où $A \neq a$), soit sur la base de l'identité abstraite des lettres (où $A = a$). Le patient évalué montrait des difficultés uniquement lorsque la décision impliquait à la fois le traitement en parallèle et l'accès aux représentations abstraites.

L'hypothèse que la dyslexie lettre-par-lettre s'explique par une incapacité à extraire rapidement l'identité abstraite des lettres semble toutefois remise en question par la découverte d'un cas de dyslexie lettre-par-lettre capable d'accéder rapidement aux représentations abstraites des lettres (Mycroft, Hanley & Kay, 2002). Ce cas éprouvait toutefois des difficultés majeures dans l'identification des lettres, ce qui maintient la possibilité qu'une difficulté dans le traitement des lettres soit sous-jacente à sa dyslexie. Il est toutefois possible, comme Price et Humphreys (1992) l'ont suggéré, que la dyslexie lettre-par-lettre puisse être causée par une variété de troubles fonctionnels distincts, ce qui soulève des doutes quant à la généralité des phénomènes observés sur une base individuelle, comme dans l'étude de Mycroft et al. (2002). Nous allons cependant voir dans la prochaine section que de nombreux auteurs tentent d'expliquer l'émergence d'une stratégie de lecture séquentielle chez les patients par une cause centrale unique : un trouble perceptif général.

Trouble perceptif général

Selon l'hypothèse d'un trouble perceptif général, la dyslexie lettre-par-lettre surviendrait à la suite d'une atteinte affectant l'ensemble des stimuli, mais qui serait davantage évident avec du matériel écrit. Une des premières études ayant invoqué un trouble perceptif général pour expliquer la dyslexie lettre-par-lettre est celle de Kinsbourne et Warrington (1962). Ces auteurs ont montré que la reconnaissance de formes simples était normale lorsqu'une seule forme était présentée à la fois. La performance de ces mêmes patients était toutefois gravement altérée lorsqu'ils devaient identifier plus d'une forme à la fois. Dans une série d'expériences, ces mêmes auteurs ont montré que le nombre de formes à reconnaître était la variable déterminante pour la performance de ces patients. Kinsbourne et Warrington ont donc conclu que l'alexie est causée par une difficulté à traiter plusieurs stimuli présentés simultanément. Cette simultanagnosie oblige les patients à reconnaître une seule lettre à la fois, d'où la stratégie compensatoire de lecture lettre-par-lettre.

S'inscrivant dans une ligne de pensée similaire, Levine et Calvanio (1978) ont montré que l'alexie-simultanagnosie (c'est le terme utilisé par ces auteurs) de leurs patients, quoique plus sévère lorsque les formes doivent être identifiées (comme lors de la lecture), était également présente lors d'une tâche d'appariement pareil/different. Cette démonstration suggère que le trouble se situe au niveau perceptif et non, par exemple, au niveau des mécanismes de dénomination. Ces auteurs ont également montré que les erreurs des patients étaient modulées par la similarité visuelle entre la lettre cible et les autres lettres. Par exemple, comparativement aux sujets contrôles, leurs trois patients éprouvaient davantage de difficultés à remarquer la présence d'une

lettre différente lorsque cette dernière était entourée de lettres visuellement similaires (e.g. OCO) relativement à une condition où les lettres adjacentes étaient visuellement dissimilaires (e.g. OXO). Ces résultats, quoique congruents avec l'hypothèse d'une simultanagnosie touchant l'ensemble des stimuli visuels le sont également avec l'hypothèse d'un trouble touchant l'identification et la discrimination des lettres visuellement similaires (voir plus haut Arguin, S. Fiset & Bub, 2002).

Friedman et Alexander (1984) ont évalué les performances d'identification d'une patiente pour des stimuli orthographiques ainsi que pour des objets et des lignes présentés brièvement (au tachistoscope). Dans ces tâches, la patiente faisait preuve d'une perception visuelle normale mais prenait un temps anormalement long à identifier le stimulus, que celui-ci soit orthographique ou non. Les auteurs ont alors proposé que la difficulté de lecture provenait d'un déficit au niveau de la vitesse d'identification visuelle, déficit qui ne serait toutefois pas spécifique au matériel orthographique.

Farah et Wallace (1991) ont effectué une étude chez un patient dyslexique lettre-par-lettre démontrant, dans un premier temps, que les tâches habituellement utilisées pour exclure un trouble perceptif chez les dyslexiques étaient soit trop peu sensibles, soit visaient des processus visuels peu impliqués dans la lecture. Dans une tâche exigeant la reconnaissance successive et rapide de stimuli visuels, leur patient montrait systématiquement une diminution des performances par rapport aux sujets normaux. Afin d'établir un lien entre le trouble visuel et la dyslexie lettre-par-lettre, les auteurs ont demandé à leur patient de lire des mots dont la qualité visuelle a été dégradée en ajoutant un masque de lignes courtes positionnées aléatoirement.

Dans ces conditions, l'amplitude de l'effet de longueur de mot chez le patient était significativement augmentée par rapport à une condition contrôle. Les auteurs proposent donc qu'un trouble visuel est à la base de la dyslexie lettre-par-lettre.

Plus récemment, Behrmann et ses collaborateurs (Behrmann et al., 1998a, 1998b ; Sekuler & Behrmann, 1996 ; Mycroft, Behrmann & Kay, soumis) ont effectué plusieurs études et fait une revue de la littérature afin de montrer que tous les patients dyslexiques éprouvaient des difficultés visuelles pouvant expliquer l'émergence d'une stratégie lettre-par-lettre. Pour ces auteurs, les appuis en faveur d'un trouble d'identification des lettres chez tous les patients sont congruents avec l'hypothèse d'un trouble perceptif général. Selon eux, la variable déterminante serait la complexité visuelle des stimuli. Ainsi, tous les patients dyslexiques évalués par cette équipe éprouvent plus de difficultés dans le traitement visuel des stimuli complexes que dans le traitement des stimuli peu complexes et l'effet délétère de la complexité augmenterait avec le nombre de stimuli à reconnaître simultanément (Mycroft et al., soumis). Le lien causal entre cette variable et la lecture des patients dyslexiques lettre-par-lettre reste toutefois à établir.

Intuitivement, la lésion occipito-temporale associée à l'alexie pure laisse présager la présence de troubles visuels chez ces patients. En fait, plusieurs des patients décrits dans la littérature présentent des troubles visuels pour des stimuli autres que les mots, comme par exemple, des difficultés à reconnaître ou à nommer les couleurs (Freedman & Costa, 1982; Geschwind & Fusillo, 1966 ; Stachowiak & Poeck, 1976). Également, des difficultés à reconnaître (agnosie visuelle) ou à nommer (aphasie optique) les objets présentés visuellement sont fréquemment observées en début d'évolution et celles-ci peuvent même demeurer permanentes (Chanoine,

Ferreira, Demonet, Nespolous & Poncet, 1998). Comme nous l'avons suggéré toutefois, la présence de troubles visuels touchant des stimuli autres que des mots n'est pas très étonnante étant donné la présence d'une lésion occipito-temporale qui est souvent suffisamment postérieure pour faire apparaître une hémianopsie homonyme droite persistante. La présence de difficultés visuelles majeures chez les patients alexiques purs ne doit donc pas être considérée comme la preuve d'une relation de cause à effet entre le trouble visuel objectivé et la présence de difficultés de lecture. Les auteurs ayant proposé une explication strictement visuelle à l'alexie pure se doivent donc d'être extrêmement prudents dans leur interprétation car ils doivent démontrer l'existence d'un lien causal entre le trouble et les difficultés de lecture, ce qui n'a pas encore été fait.

Trouble fonctionnel dans la dyslexie lettre-par-lettre

Comme nous venons de le voir, plusieurs théories ont été proposées afin d'expliquer l'émergence d'une lecture lettre-par-lettre chez les patients alexiques. Certains auteurs proposent toutefois que des explications différentes pourraient être valides pour des patients distincts (Kay & Hanley, 1991; McCarthy & Warrington, 1990; Price & Humphreys, 1992). Ainsi, la lecture lettre-par-lettre ne serait qu'une stratégie compensatoire commune pour des déficits différents plutôt qu'une condition homogène. Le but de cette thèse n'est pas de démontrer que le même trouble fonctionnel est la base des difficultés de tous les patients dyslexiques, mais plutôt qu'une condition semble essentielle et surtout suffisante à l'émergence d'une dyslexie lettre-par-lettre, c'est-à-dire la présence d'une difficulté dans la discrimination visuelle des lettres visuellement similaires.

UN DÉFICIT DU TRAITEMENT EN PARALLÈLE DES LETTRES

Tout au long de cette thèse, nous allons suggérer, en lien avec l'étude de Arguin, S. Fiset & Bub (2002), que les patients dyslexiques lettre-par-lettre éprouvent des difficultés à reconnaître les lettres visuellement similaires lorsqu'un traitement en parallèle des lettres est exigé. Selon cette hypothèse, la stratégie séquentielle compensatoire servirait à améliorer le signal visuel afin de discriminer les lettres visuellement similaires.

Afin d'en venir à cette conclusion, nous allons nous poser trois questions qui serviront de tremplin aux différentes expériences rapportées dans les deux articles.

1 – Est-il possible que certains patients dyslexiques lettre-par-lettre aient un accès résiduel au traitement en parallèle des lettres en reconnaissance explicite de mots écrits et ce, contrairement à ce que plusieurs chercheurs suggèrent?

Il existe dans la littérature certaines preuves que des patients dyslexiques lettre-par-lettre puissent montrer des capacités de lecture implicite dans certaines conditions. Par exemple, Landis, Regard et Serrat (1980) ont observé un patient capable d'apparier un mot présenté brièvement (seulement 30 ms) à un objet (parmi un ensemble) et ce, malgré que le patient soit incapable de lire le mot ou même de le percevoir consciemment. Les données sur ce patient sont toutefois minimales et ses capacités implicites sont disparues dès que la stratégie lettre-par-lettre s'est établie. Par la suite, Shallice et Saffran (1986) ont fait une analyse plus systématique d'un patient (ML) montrant une performance supérieure au hasard dans des tâches de décision lexicale ou sémantique et ce, malgré des temps de présentation insuffisants pour l'identification

explicite du mot. Une série de travaux effectuée par Coslett, Saffran et collaborateurs a étoffé l'idée d'un accès lexical ou sémantique rapide chez certains patients et ce, même lorsque le mot était présenté pendant seulement 250 ms (Coslett & Saffran, 1989; Coslett, Saffran, Greenbaum & Schwartz, 1993 ; voir Coslett & Saffran, 1994 et Saffran & Coslett, 1998 pour des revues de écrits). Il est à souligner toutefois que certains dyslexiques ne présentent pas cette dissociation entre capacité de lecture implicite et incapacité à lire de façon explicite (McKeeff & Behrmann, sous presse). Coslett et al. (1993) ont suggéré que les expérimentateurs devaient convaincre les patients d'abandonner la lecture sérielle pour faire place à une lecture plus globale du mot. La capacité de certains patients à catégoriser un mot selon sa lexicalité ou sa sémantique fut la première démonstration empirique de lecture implicite chez les dyslexiques LPL. Il est possible toutefois de concevoir que l'accès rapide aux connaissances lexicales et sémantiques puisse également influencer la performance des patients dans d'autres tâches. Par exemple, certains patients montrent une meilleure reconnaissance des lettres présentes dans un mot que dans un pseudo-mot (effet de supériorité du mot; Bub, Black & Howell, 1989 ; Bowers, Bub & Arguin, 1996). D'autres études ont également permis de mettre en évidence des effets importants et significatifs de l'amorçage orthographique (Bowers, Arguin & Bub, 1996) et sémantique (Bub & Arguin, 1995) ainsi que des effets de fréquence lexicale, d'imageabilité et de voisinage orthographique en dénomination de mots écrits (voir Behrmann, Plaut & Nelson pour une revue des écrits ; Arguin, Bowers & Bub, 1998 ; Arguin, Fiset & Bub, 2002). Ces effets sont tous congruents avec un accès lexico-sémantique rapide, bien que celui-ci ne puisse, à l'évidence, supporter de façon fiable la reconnaissance explicite du mot.

2 – Pourquoi ce traitement en parallèle des lettres est-il insuffisant pour la reconnaissance explicite des mots écrits dans la dyslexie lettre-par-lettre?

3 - Quelle est la fonction de la stratégie séquentielle lettre-par-lettre dans cette dyslexie?

Le but des deux articles rapportés dans cette thèse sera de répondre à ces trois questions.

CHAPITRE DEUXIÈME

ARTICLE 1

Fiset, D., Arguin, M. & McCabe, É. (en préparation). The breakdown
of parallel letter processing in letter-by-letter dyslexia.

THE BREAKDOWN OF PARALLEL LETTER PROCESSING
IN LETTER-BY-LETTER DYSLEXIA

Daniel Fiset, Martin Arguin and Éric McCabe

Groupe de Recherche en Neuropsychologie Expérimentale et Cognition, Département de
psychologie, Université de Montréal
and
Centre de recherche, Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal

Address correspondence to:

Martin Arguin, Ph.D.
Département de psychologie
Université de Montréal
C.P. 6128, Succ. Centre-ville
Montréal, QC
H3C 3J7

Fax: 514-343-5787

Phone: 514-343-2167

Email: [REDACTED]

ABSTRACT

Two critical issues were examined regarding letter-by-letter (LBL) dyslexia: 1- What is the nature of the functional impairment responsible for the incapacity of LBL patients to process letter strings in parallel? 2- What is the purpose of sequential letter processing? Four experiments focussing on these issues were conducted in LH, an LBL dyslexic. Exp. 1 showed facilitatory effects of increased phonographic neighbourhood size, lexical frequency, and imageability on the word naming performance of LH. These high-order effects reflect a modulation of parallel letter processing in LH and demonstrate that he is able to rapidly access phonological, lexical and semantic knowledge during reading. Congruently, Exp. 2 demonstrated that all three high-order effects are eliminated when words are presented one letter at a time, from left to right. Exp. 3 showed that these high-level effects are abolished if target words are made of letters that are highly confusable to other letters of the alphabet. These observations suggest that LBL dyslexia may rest on an impairment at the letter encoding level that causes an excessive level of background noise in the activation of higher-order representations (i.e. letter combinations) when letters are processed in parallel. An additional experiment (exp. 4) shows that the letter confusability effect is also eliminated when words are presented one letter at a time, from left to right. This latter finding suggests that compensatory sequential processing invoked by LBL dyslexics serves to avoid the confusion between visually similar letters which is present with parallel letter processing, and to amplify the signal-to-noise ratio required to achieve overt word identification.

Key words: Dyslexia, Letter-by-letter reading, Visual processing

INTRODUCTION

Letter-by-letter (LBL) dyslexia is an acquired reading disorder caused by a left occipital lobe lesion (Binder & Mohr, 1992; Cohen et al, 2003; Damasio & Damasio, 1983; Dejerine, 1892). It is characterized by very slow reading rate and a large linear word length effect. Increases of word reading latencies in the order of 500-3000 milliseconds per additional letter have been measured (Hanley & Kay, 1996; see however Sekuler & Behrmann, 1996 for milder case). This performance pattern suggests a letter-by-letter strategy that contrasts with normal reading, where the number of letters has no significant impact on reaction times at least with relatively short (6 letters or less) high frequency words or when the number of orthographic neighbours (N size; words of the same length that differ from the target by just one letter; Coltheart, Davelaar, Jonasson & Besner, 1977) is matched across word lengths (Weekes, 1997)¹. This latter pattern of results indicates that normal subjects process letters in parallel for word recognition.

The view that LBL patients are completely unable to perform visual word recognition by a parallel processing of letters has been questioned over the last 20 years. A comprehensive investigation of a phenomenon referred to as implicit reading was first reported by Shallice and Saffran (1986). They showed that patient ML was capable of indicating the lexical status (i.e. if the stimulus is a word or not), despite being incapable of reading aloud the target word within the allowed time. Subsequent investigations performed in other patients found similar discrepancies, that is above-chance lexical or semantic classification (e.g. the stimulus represent an animal or not?) performance under brief presentation duration (between 100-250 ms, depending on the study) with little or no explicit word recognition (Coslett & Saffran, 1989; Coslett, Saffran,

Greenbaum, & Schwartz, 1993; see Saffran & Coslett, 1998 for an overview). Such findings suggest that some LBL patients are capable of processing orthographic stimuli in parallel and to rapidly access lexical and semantic information. The ability to make lexical or semantic decisions on words without overtly recognizing them is one of the most spectacular demonstrations that LBL dyslexics can rapidly access lexical/semantic knowledge through parallel letter processing.

There is a range of other findings that also suggests rapid activation of high-level representations in LBL dyslexics. For example, some patients show a word-superiority effect, that is a superior letter recognition performance for letter strings that correspond to words than to nonwords under masked presentation (Bowers, Bub & Arguin, 1996; Bub, Black & Howell, 1989; Reuter-Lorenz & Brunn, 1990; see however Behrmann, Black & Bub, 1990; Kay & Hanley, 1991). Semantic and orthographic repetition priming (Bub & Arguin, 1995; Bowers, Arguin & Bub, 1996) and the presence of a Stroop effect (McKeeff & Behrmann, in press a; McKeeff & Behrmann, in press b) also provide support for the hypothesis that parallel letter processing is capable of activating high-level representations in LBL dyslexia².

Such evidence for preserved implicit reading in LBL dyslexics is only observed in a small fraction of patients (see Behrmann, Plaut & Nelson, 1998). Coslett et al. (1993) have suggested that differences between patients for the presence/absence of implicit effects could be explained by the reading strategy used. These authors suggested that, in order to obtain implicit reading effects, dyslexic patients should abandon their typical letter-by-letter strategy and instead use a parallel strategy of reading. In our experience, many LBL patients are reluctant to do so, which limits the applicability of implicit reading tasks for the study of parallel letter processing and its

breakdown in LBL dyslexia. Here, we use a word naming task that induces more consistent high-level effects.

Some researchers have provided evidence for the implication of high-level orthographic (i.e. lexical frequency and orthographic neighbourhood size) as well as semantic (i.e. imageability) variables in word naming (Arguin, & Bub 1993, 1996; Arguin, Bub & Bowers, 1998; Arguin, Fiset & Bub, 2002, Bowers, Arguin & Bub, 1996; Bowers, Bub & Arguin, 1996; Howard, 1991; Kay & Hanley, 1991; Price & Humphreys, 1992; Sekuler & Behrmann, 1996; see Behrmann, Plaut & Nelson, 1998 for a review). These effects are qualitatively comparable to those found in normal readers: increasing lexical frequency, imageability, or N size all lead to increasing the speed of reading of most LBL subjects. Therefore, most dyslexics seem able to rapidly access their lexical and semantic knowledge which contributes to their overt reading performance. Clearly however, the achieved lexical/semantic activation remains partial since the threshold for explicit identification is rarely reached. It can thus be argued that the functional impairment responsible for LBL dyslexia prevents the lexical/semantic activation to reach threshold, thereby forcing LBL patients to use sequential reading strategy for overt word recognition. The discovery of a factor that modulates the activation of high-level knowledge would be of major utility to identify the cause of LBL dyslexia and why they have to use letter-by-letter reading.

Recently, Arguin, Fiset, and Bub (2002) have proposed that the disorder of LBL dyslexia may be caused by an impairment at the letter encoding stage (see also Arguin & Bub, 1993; Behrmann & Shallice, 1995; Kay & Hanley, 1991; Reuter-Lorenz & Brunn, 1990). More specifically, Arguin et al. (2002) showed that the facilitatory effect of N size disappears when

patient IH had to read words composed of high confusability letters (letter confusability is defined by the visual similarity between a target letter and all other letter of the alphabet)³. From this, they argued for a difficulty of letter encoding that prevents parallel processing from reliably supporting overt word recognition; thereby forcing the sequential letter processing that is characteristic of the disorder. This result suggests that whereas parallel letter processing provides ambiguous information to the lexical system about the letters of the target word, sequential letter processing can provide clear and decisive information in this regard (also Arguin & Bub, submitted). The cause of the N size effect observed in IH (and in all other patients tested) remains uncertain, however. One sub-objective of the first experiment will be a better understanding of the N size effect.

The aim of this paper is to examine two critical issues regarding LBL dyslexia: 1- What is the nature of the functional impairment responsible for the incapacity of patients to reliably identify words through parallel letter processing? 2- What is the function of sequential letter processing in the disorder? The first set of experiments (Exps 1a – 1c) was designed to verify if LH, a LBL dyslexic, shows high-level variables effects (orthographic neighbourhood size, lexical frequency and imageability effects) in word naming latency. In the second set of experiments, we verified the effect of sequential presentation on the three high-level effects (Exps 2a-2c). The third set of experiments (Exps 3a – 3c) was designed to investigate possible interactions between the effects of high-order variables and letter confusability. To address the second question, a last experiment was designed to verify the effect of sequential letter presentation on the confusability effect (Exp. 4). In the general discussion, we discuss the implications of these results for the modelling of letter-by-letter dyslexia.

CASE REPORT

The patient who took part in the present experiments is LH. He is a right-handed French-speaking male who was between 42 and 44 years of age at the time of testing. At the age of 39, in 1998, LH suffered a cerebral vascular accident in the context of a resection of the left vertebral artery. An MRI revealed a left temporal-occipital encephalomalacia. LH's behavioural complaints are a complete right-homonymous hemianopia, reading problems and a complete quadriplegia. A very mild memory problem and some word-finding difficulties are equally reported by LH but are not prominent in the neuropsychological examination.

In conversation, LH shows a very good vocabulary and impressive general knowledge. In order to verify our appreciation, we evaluated LH with the Wechsler adult intelligence scale III (WAIS III). This evaluation showed that LH has a verbal IQ highly above average (144) with no significant difference between subtests. The performance IQ has not been evaluated because most tasks required the use of the hands. However, the few tasks used demonstrated very good non-verbal capacities in LH, as measured by the matrix reasoning (scaled score of 16) and the picture completion tasks (scaled score of 14). The intellectual capacities of this patient are thus preserved.

A number of subtests of the Birmingham Object Recognition Battery (BORB; Riddoch & Humphreys 1993) were also administered to LH. He performed well within the normal range in tasks involving the discrimination of length (29/30), height (29/30), orientation (29/30), or of the spatial position of a blank space with a circle (29/30). LH identifies capital letters with ease when

presented individually (26/26) or in superposition (54/54). Performance is also normal in the object decision (33/36) and object naming subtasks (73/76). These findings suggest that LH does not exhibit any obvious visual agnosia under these testing conditions.

We also administered reading and spelling tasks in order to verify the co-occurrence of other forms of dyslexia or dysorthographia. Naming of visually presented regular (56/56) and irregular (55/56) words as well as pseudowords (36/36) was accurate with no significant difference across stimulus type. LH thereby does not suffer from either surface or phonological dyslexia. In a spelling task using regular and irregular words, LH showed a normal performance with no significant regularity effect (regular = 35/36, irregular = 34/36), thereby indicating no surface dysgraphia.

The studies reported in this paper have been approved by the Ethics committee of the Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal, where this work has been conducted.

WORD LENGTH EFFECT

This next section investigates the word length effect in the reading performance of LH. We compared his performance with that of seven young neurologically intact subjects aged between 20 and 29. All were right-handers, had normal or corrected vision and have equally participated as control in the third experiment. LH was administered a word naming task comprising 200 stimuli which ranged in length between four to seven letters (50 words of each length) matched across lengths on lexical and bigram frequencies, number of orthographic neighbours (N size), and letter confusability.

Table 1 shows the correct RT's obtained by LH in each condition. No trial was more than three standard deviations away from the mean of their condition in this task. An ANOVA conducted on the correct RTs with word length as factor showed a highly significant effect of length [$F(3,149) = 26.8; p < 0.001$]. Indeed, the patient's average naming latency was of 3456 ms for 4-letter words and it increased linearly ($r^2 = 0.97$) by 526 ms for each additional letter in the word. A chi-square analysis of error rates as a function of word length showed no significant effect [$\chi^2(3) = 5.78; ns$].

Table 1 shows the correct RT's obtained in the neurologically intact readers for each condition. Correct RT's that were more than three standard deviations away from the mean of their condition (1.0 % of trials) in the data of individual subjects were rejected as outliers. The correlation between correct RTs and error rates was of +0.02 (ns), thus showing no speed-accuracy trade-off. The ANOVA applied on the correct RT's observed in these subjects with word length as factor showed a tendency for an effect of word length [$F(3,6) = 3.4; p = 0.07$]. Indeed, the naming latencies of young normal subjects increased by 6 ms ($r^2 = 0.57$) for each additional letter in the word. The analysis applied on error rates showed no effect of word length [$F(1,6) = 1.1, ns$].

In order to rule out the possibility that output processing deficits may be contributing to LH's reading difficulties, the patient was asked to perform a lexical decision task. In this task, LH was shown words and pseudowords on a computer screen. He was instructed to say "yes" when he thought the stimulus was a word and "no" when he thought the stimulus was not a word (we

could not use a button box due to LH's quadriplegia). A new list of 200 words ranging in length from four to seven letters was used for this lexical decision task. Across lengths, words were matched for lexical and bigram frequencies, N size, and letter confusability. The 200 pseudowords were constructed by changing one or two letter in a real word. All pseudowords were orthographically legal.

Table 1 shows the correct RT's obtained in LH in each condition. Five data point (1.8 % of correct trials) were removed from the RT analysis because the response latency was more than three standard deviations away from the mean of its condition. A two-way ANOVA conducted on correct RTs with word length and lexicality as factors showed main effects of word length [$F(3,272) = 35.7; p < 0.001$] and of lexicality [$F(1,272) = 26.6; p < 0.001$]. The interaction between these factors was not significant [$F(3,272) < 1$]. The main effects indicate increasing RTs with longer words and shorter RTs for words than for pseudowords. With word and pseudoword data combined, LH showed a linear letter string length effect of 616 msec / letter ($r^2 = 0.98$). Chi-square analysis of error rates as a function of word length showed a significant effect of length for words [$\chi^2(3) = 7.70; p < 0.05$] but no such effect for pseudowords [$\chi^2(3) = 1.17; ns$].

Seven normal subjects served as control in the lexical decision task. In contrast to LH, they responded by a keypress on a button box; they pressed the right button (with their right hand) to signal a word and the left button (with their left hand) to signal a pseudoword.

Table 1 shows the correct RT's obtained in the neurologically intact readers in each condition. Correct RT's that were more than three standard deviations away from the mean of

their condition (1.8 % of trials) were rejected as outliers. The correlation between correct RTs and error rates was of +0.33 ($p < 0.05$), thus showing no speed-accuracy trade-off. A two-way ANOVA conducted on correct RTs with word length and lexicality as factors showed main effects of word length [$F(3,6) = 9.8; p < 0.01$] and of lexicality [$F(3,6) = 8.1; p < 0.05$]. The interaction between these factors was not significant [$F(3,6) = 1.2, ns$]. The main effects indicate increasing RTs with longer words and shorter RTs for words than for pseudowords. With the data for words and pseudowords combined, the normal subjects show an average length effect of 11 msec / letter ($r^2 = 0.63$). The analysis applied on error rates showed no main effect of either word length [$F(1,6) = 1.9, ns$] or of lexicality [$F(1,6) < 1$], and no interaction between these variables [$F(1,6) < 1$].

Insert Table. 1 near here.

To summarize, LH shows a significant word length effect in naming as well as in lexical decision and his performance is clearly distinct from that obtained by normal subjects. The fact that LH's anomalous performance occur in a task that only requires visual recognition (lexical decision task) but no spoken output indicates that his abnormal reading latencies are most likely due to an input processing deficit. Therefore, LH shows the characteristic clinical symptoms of LBL dyslexia.

EXPERIMENTAL STUDY

EXPERIMENT 1: High-level effect

In a literature review, Behrmann, Plaut and Nelson (1998) showed that most dyslexic patients read more rapidly words with a high lexical frequency or a high imageability. Previous studies by Arguin and collaborators (Arguin & Bub, 1996, Arguin, Bub & Bowers, 1998; Arguin, Fiset & Bub, 2002; see also Montant & Behrmann, 2001) also showed a significant facilitatory effect of the number of orthographic neighbours. Exp. 1 examined whether these variables modulate reading speed in LH.

Method

Procedure. Each trial began with a 500 msec fixation point displayed at the centre of a computer screen. This was followed by the target printed in upper case and presented to the left of the fixation point (because of the patient's right hemianopia), which remained visible until the subject's response. The task was to name the target as rapidly as possible while avoiding errors. All stimuli appeared in black on a white background and were printed in Courier-New 24-point bold font. Stimuli subtended 2.05, 2.75, 3.45 and 4.15 degrees of visual angle for four-, five-, six- and seven- letter words respectively (height of .6 degree of visual angle). Responses were registered by a voice-key connected to the computer controlling the experiment. After each response, the experimenter registered the subject's response via the computer keyboard and then triggered the next trial by a key press.

Exp 1a: Orthographic neighbourhood size effect

As Montant and Behrmann (2001) have suggested, a facilitatory neighbourhood size effect can arise at various processing stages. In normal subjects, two hypotheses have been proposed. The one, proposed by Andrews (1989, 1992, 1997) is based on the interactive-activation model of McClelland and Rumelhart (1981). This model proposed that the presentation of a written word activates not only the specific node associated with that word, but also the nodes of its orthographic neighbours. Through top-down activation, the activated lexical nodes facilitate letter recognition and this facilitation is greater for targets with a large N size given the greater number of activated lexical nodes. This hypothesis, exclusively lexical, offers an intuitive explanation for the facilitatory effect of orthographic neighbours found in dyslexics who frequently show difficulty in recognizing letters (Behrmann & Shallice, 1995; Patterson & Kay, 1982; Perri, Bartolomeo & Silveri, 1996). An alternative account of N size effect has been proposed, however, which rests on the fact that words with many neighbours have more body/rime neighbours that may disambiguate the pronunciation of the vowel in the target word (Treiman, Mullennix, Bijeljac-Babic, & Richmond Welty, 1995). Congruently, Peereman and Content (1997) have shown that increasing N size has a facilitatory effect only if the orthographic neighbours are also phonological neighbours (phonological neighbours of a target letter string are words of the same number of phonemes that differ from it by just one phoneme). The aim of experiment 1a is to assess the above theories in order to understand the origin of the orthographic neighbourhood size effect found in dyslexics.

The reading performance of LH was examined as a function of numbers of orthographic neighbours from either of two classes; phonographic neighbours and pure orthographic

neighbours. Phonographic neighbours (PhN) are words that are both orthographic neighbours (same letter length, differ by one letter) and phonological neighbours (same phoneme length, differ by one phoneme) of the target. Pure orthographic neighbours (PON) are words that are orthographic but not phonological neighbours of the target. For example, the French word "TAIE" (/tɛ/) have "BAIE", "PAIE", "RAIE" (/bɛ/, /pɛ/, /rɛ/) as PhN but "TAPE" and "TAXE" (/tap/ and /taks/) as PON. The logic is as follows, if the N size effect can be explained by a word-to-letter feedback mechanism, then increasing the number of orthographic neighbours (of whichever type) would help reading the target. If, on the contrary, the facilitatory N size results from the fact that lexical phonology is more readily accessible for large N size targets, then only phonographic neighbours will contribute to reading performance.

In Exp. 1a, LH was asked to read aloud individually presented words. The effects of PhN and PON were measured by comparing performances on words with few PhN and PON (baseline) to those with high PhN or high PON sizes, respectively. Given that the French language offers relatively few words with many pure orthographic neighbours, it was not possible to match the sets of PhN, PON, and control words triplet-wise on all fundamental stimulus parameters that would be likely to affect performance if left uncontrolled. For avoid this problem the experiment was divided in two sub-tasks: 1 - PhN task, 2 - PON task. In each sub-tasks, the words from the baseline condition were matched pairwise to those with either many PhN (task 1) or many PON (task 2).

Stimuli

1- PhN size task : Stimuli were 130 four- and five- letter French words divided equally into two conditions defined according to PhN (low : no PhN ; high : more than 4 PhN). Across conditions, words were matched pairwise on the number of letters, lexical frequency (Content, Mousty & Radeau, 1990) [$F(1,128) < 1$], bigram frequencies [$F(1,128) = 2.0; ns$], number of pure orthographic neighbours [$F(1,128) < 1$], and letter confusability [$F(1,128) < 1$].

2- PON size task : Stimuli were 76 four- and five- letter French words divided equally into two conditions defined according to pure orthographic neighbourhood size (low : no PON ; high : more than 4 PON). Across conditions, words were matched pairwise on the number of letters, lexical frequency (Content, Mousty & Radeau, 1990), bigram frequencies, number of PhN, and letter confusability [all F's (1,74) < 1].

Results

Four data points (3.4 % of correct trials) were removed from the RT analysis of the PhN task because response latencies were more than three standard deviations away from the mean of their condition. No such outlier was removed from the RT analysis of the pure orthographic neighbourhood task.

PhN task: LH named high PhN size words significantly faster than low PhN words (4478 msec and 5383 msec respectively) [$t(113) = 4.28, p < 0.001$]. A chi-square analysis of error rates showed no significant effect of PhN size [$\chi^2(3) = 3.81; ns$].

PON task: The naming latencies for the low and high PON items did not differ significantly (4438 msec and 4319 msec respectively) [$t(69) < 1$]. A chi-square analysis of error rates as a function of PON size showed no significant effect of this factor [$\chi^2(3) = 0.21; ns$].

Experiment 1a has demonstrated a PhN size effect on LH's naming latency. This replicates and extends the findings of Arguin et al. (Arguin & Bub, 1996, Arguin, Bub & Bowers, 1998; Arguin, Fiset & Bub, 2002) showing that LBL dyslexics are sensitive to N size. Furthermore, our result support the conclusions of Peereman and Content (1997) suggesting that the facilitatory effect of the number of orthographic neighbours in naming comes from the fast activation of the neighbours that have a similar pronunciation to that of the target. Although our interpretation of the orthographic neighbourhood size effect is quite different from that proposed by Arguin et al. (1996; 1998; 2002), we maintain that it reflects the implication of parallel letter processing in letter-by-letter dyslexia (see experiment 2). The results obtained here thus suggest an important role of phonological information in the probability of an efficient parallel letter processing in dyslexics patients (see also Montant, 1998).

Experiment 1b: Lexical frequency effect

N size is not the only high-level variable known to influence reading latency in LBL dyslexia. Thus, Behrmann et al. (1998) have reported evidence for lexical frequency and imageability effects in some LBL dyslexics. Exps. 1b and 1c are designed to assess the latter effects in LH.

Stimuli

The targets were 110 four- and five-letter words divided equally in two conditions defined according to lexical frequency (low : less than 2000 / 100 millions; high : more than 5000 / 100 millions in the Brulex Database, Content et al., 1990). There were 55 targets in each condition. Across conditions, words were matched pairwise according to their number of letters, bigram frequency, PhN size, and letter confusability (all $F < 1$).

Results

One data point (0.9 % of correct trials) was removed from the RT analysis because the response latency was more than three standard deviations away from the mean of its condition. High frequency words (3845 ms) resulted in shorter response latencies than low frequency words (4928 ms) [$t(100) = 5.37$, $p < 0.001$]. This replicates the frequency effects reported by number of investigators in LBL dyslexics (see Behrmann et al., 1998). The number of errors in LH' data was not sufficient (only 1 % of trials) to afford a chi-square analysis.

Experiment 1c: Imageability effect

Exp. 1c was designed to assess the imageability effect with LH. Norms for words imageability were obtained in our laboratory in 12 normal subjects. Subjects had to judge whether a written word was imageable or not on a seven-point scale, where 1 meant a very low imageability and 7 a very high imageability level.

Stimuli

The targets were 120 five- and six-letter words divided equally in two conditions defined according to imageability (low : less than 2; high : more than 5). There were 60 targets in each condition. Across conditions, words were matched pairwise according to their number of letters, lexical frequency, bigram frequency, PhN size, and letter confusability (all $F < 1$).

Results

One data point (0.8 % of trials) was removed from the RT analysis because the response latency was more than three standard deviations away from the mean of its condition. High imageability words (5237 ms) resulted in shorter response latencies than low imageability words (6322 ms) [$t(111) = 3.0, p < 0.005$]. This replicates the imageability effects reported previously by Behrmann et al. in LBL dyslexics. The number of errors in LH's data (two) was not sufficient to afford a chi-square analysis but both errors are made in the low imageability condition.

EXPERIMENT 2: High-level effects with serial letter presentation

In Exp. 1, we showed that the reading performance of LH is modulated by three high-level variables namely PhN size, lexical frequency, and imageability. We suggest that these effects reflect the implication of parallel letter processing in LH's reading. If this interpretation is correct, then the impact of high-level effects should be blocked if letter processing is exclusively sequential in LBL patients. To test this hypothesis, three new tasks were constructed to evaluate PhN size, lexical frequency, and imageability effects when the letters in words are presented sequentially, a procedure that effectively prevents any possibility of parallel letter processing. In order to ascertain that the words chosen for these tasks had the capacity of provoking high-level effects,

the results obtained with this sequential paradigm were compared with those obtained two months later with the same words but using a procedure identical to that of Exp. 1.

Method

Procedure: Each trial began with a fixation point that was presented at the centre of the computer screen for 500 msec. The first letter of the word followed immediately thereafter. Each subsequent letter appeared incrementally at a rate of one additional letter every 550 ms proceeding from left to right. Letters were printed in uppercase and they remained visible until the subject's response. LH was instructed to name the word as quickly as possible while avoiding errors. As in the preceding experiments conducted in LH, all letters appeared to the left of the fixation point. All the words used in this experiment were chosen to have an orthographic uniqueness point (the position of the first letter, reading from left to right, that distinguishes a word from all other printed words, Kwanten & Mewhort, 1999) on the last letter in order to prevent LH from guessing the word before the end of the sequential presentation. The procedure for the control experiment (i.e. classical word naming paradigm) was the same as for Exp. 1.

Experiment 2a: Phonographic neighbourhood size effect

Stimuli. The targets were 80 five-letter words divided equally into two conditions defined according to the number of PhN (low: 0; high: 5 or higher). There were 40 targets in each condition. Across conditions, words were matched pairwise according to their number of letters, lexical frequency, bigram frequency, and letter confusability (all F's < 1).

Result

Sequential presentation: Two data point (2.9 % of correct trials) were removed from the RT analysis because the response latency was more than three standard deviations away from the mean of its condition. The analysis performed on correct RTs showed no significant effect of PhN size [$t(71) < 1$]. A chi-square analysis of error rates as a function of PhN size showed no significant effect of PhN size [$\chi^2(1) = 1.09; ns$].

Simultaneous presentation: One data point (1.3 % of correct trials) was removed from the RT analysis because the response latency was more than three standard deviations away from the mean of its condition. The analysis performed on correct RTs showed significant effect of PhN size [$t(73) = 4.65, p < 0.001$]. A chi-square analysis of error rates as a function of PhN size showed no significant effect of PhN size [$\chi^2(1) = 0.00; ns$].

Experiment 2b: Lexical frequency effect

Stimuli. The targets were 80 five- to seven- letters low confusability words (less than 0.45) divided equally into two conditions defined according to lexical frequency (low : less than 2000 / 100 millions; high : more than 5000 / 100 millions in the Brulex Database, Content et al., 1990). There were 40 targets in each condition. Across conditions, words were matched pairwise according to their number of letters, bigram frequency, PhN size, and letter confusability (all $F < 1$).

Result

Sequential presentation: One data point (1.4 % of correct trials) was removed from the RT analysis because the response latency was more than three standard deviations away from the

mean of its condition. The analysis performed on correct RTs showed no effect of lexical frequency [$t(67) < 1$]. A chi-square analysis of error rates as a function of lexical frequency showed no significant effect [$\chi^2(1) = 0.01; ns$].

Simultaneous presentation: No trial was more than three standard deviations away from the mean of their condition in this task. The analysis performed on correct RTs showed a significant effect of lexical frequency [$t(73) = 2.47, p < 0.05$]. A chi-square analysis of error rates showed no significant effect of frequency [$\chi^2(1) = 0.00; ns$].

Experiment 2c: Imageability effect

Stimuli. The targets were 80 five- to seven- letters low confusability words divided equally into two conditions defined according to imageability (low : below 2,5; high : 5 or higher). There were 40 targets in each condition. Across conditions, words were matched pairwise according to their number of letters, lexical frequency, bigram frequency, PhN size, and letter confusability (all $F < 1$).

Result

Sequential presentation: No trial was more than three standard deviations away from the mean of their condition in this task. The analysis of correct RTs as a function of imageability showed no significant effect [$t(66) < 1$]. A chi-square analysis of error rates as a function of imageability showed no significant effect of imageability [$\chi^2(1) = 0.51; ns$].

Simultaneous presentation: One data point (1.4 % of correct trials) was removed from the RT analysis because the response latency was more than three standard deviations away from the mean of its condition. The analysis of correct RTs showed a significant effect of imageability [$t(76) = 3.3$, $p = 0.001$]. A chi-square analysis of error rates as a function of imageability showed no significant effect [$\chi^2(1) = 1.14$; ns].

Discussion

The aim of Exp. 2 was to verify the hypothesis that the high-level effects observed on the reading performances of LH resulted from the residual capacities of parallel processing in our patient. Thus, we compared the high-level effects for two experimental conditions. In the first condition, each letter of the target word appeared sequentially from left to right in order to prevent the parallel processing of letters. In the control condition, all letters were presented simultaneously so the parallel processing of letters could occur. The results are clear: the reading performance of LH is modulated by the high-level variables only when the parallel processing of letters is possible. The outcome of this parallel letter processing thus seems sufficient to activate some high-level knowledge that can facilitate visual word recognition through feedback (Behrmann et al., 1998). LBL dyslexics are however unable to use this parallel letter processing to identify a word rapidly and with certitude, thereby forcing the sequential letter processing characteristic of the disorder. The aim of experiment 3 is to provide a better understanding of this incapacity.

EXPERIMENT 3: The modulation of high-level effects by letter confusability

Experiment 3 examined whether high-level effects, which are associated with the parallel processing of letters, are modulated by the factor of letter confusability. The results obtained in

our laboratory in anglophone patients (Arguin & Bub, 1996; Arguin & Bub, submitted; Arguin, Fiset & Bub, 2002) have shown that a facilitatory effect of the number of orthographic neighbours occurs with low letter-confusability words but that it is absent with words made of high confusability letters. Since the results of experiment 1a suggest that the facilitatory effect of N size is actually based on the number of PhN, we will assess the interaction of this variable with letter confusability in LH. Two additional tasks will assess separately the impact of letter confusability on the lexical frequency and imageability effects. All three tasks of experiment 3 were performed by LH and seven neurologically intact normal subjects (the same as in the experiments assessing the word length effect). The comparison with normal subjects was necessary to confirm that letter confusability has no effect on the reading performance of normal subjects, as shown previously by Arguin et al. (2002) and, most importantly, that it does not interact with the high-level effects that normal readers may demonstrate. The procedure used for these three tasks was the same as in experiment 1.

Method

Subjects. Subjects were LH and a group of seven neurologically intact university students.

Procedure. For LH, the procedure was identical to that of Exps. 1 a-c. For the young neurologically intact readers, the stimuli were centered on the location of ocular fixation.

Experiment 3a: Phonographic neighbourhood size x confusability

Stimuli

The targets were 240 four- to seven-letter words with low or medium lexical frequency (less than 3000 / 100 millions) varying orthogonally on their number of PhN (low : 0; High : more than 3) and their average letter confusability (low : below 0.43; high : 0.52 or higher). There were 60 targets in each condition. Across conditions, words were matched according to number of letters, lexical frequency, and bigram frequency [all F's (1,236) < 1]. A post-hoc analysis demonstrated no difference between conditions on imageability.

Fig. 1a shows the correct RTs obtained in LH in each condition of Exp. 2a. Correct RTs that were more than three standard deviations away from the mean of their condition (0.9% of trials) were rejected as outliers. The correlation between correct RTs and error rates was of +0.79 (ns), thus showing no speed-accuracy trade-off. A two-way ANOVA performed on correct RTs with PhN size and confusability as factors showed a main effect of letter confusability [$F(1,210) = 10.1, p < 0.005$] but no main effect of PhN size [$F(1,210) = 1.9, ns$]. The interaction between PhN size and letter confusability was significant [$F(1,210) = 6.7, p = 0.01$]. Simple effect analysis indicated that increasing the number of PhN had a large facilitatory effect with low confusability words [$F(1,210) = 13.7, p < 0.001$] but no effect with high confusability targets [$F(1,210) < 1$]. A chi-square analysis of error rates as a function of PhN size showed no significant effect of this factor [$\chi^2(3) = 5.28; ns$].

Fig. 1b shows the correct RTs obtained with neurologically intact readers in each condition. Correct RTs that were more than three standard deviations away from the mean of their condition (1.7% of trials) were rejected as outliers. The correlation between correct RTs and error

rates was of +0.18 (*n.s.*), thus showing no speed-accuracy trade-off. The ANOVA applied on the correct RT's observed in these subjects with factors of letter confusability and PhN size showed a significant effect of PhN size [$F(1,6) = 8.0; p < 0.05$], no effect of letter confusability [$F(1,6) = 1.2, \text{ns}$], and no interaction between these two factors [$F(1,6) = 2.2; \text{n.s.}$]. The significant PhN size effect indicates shorter RT's with targets that have many PhN than with targets that have few. The analysis applied on error rates showed no main effect of letter confusability [$F(1,6) = 1.0, \text{ns}$] but a trend for a facilitatory effect of increased PhN [$F(1,6) = 4.2, p = 0.09$]. The interaction between these two factors was not significant [$F(1,6) < 1$].

Insert Fig. 1 near here.

Experiment 3b: Lexical frequency x confusability

The targets were 240 five-, six- and seven-letter words varying orthogonally on their lexical frequency (low: below 500 per 100 million; High: more than 5000 per 100 million in the Brulex database, Content et al., 1990) and their average letter confusability (low: below 0.43; high: 0.52 or higher). There were 60 targets in each condition. Across conditions, words were matched according to number of letters, bigram frequency, and PhN size [all F's (1,236) < 1]. A post-hoc analysis demonstrated no difference between conditions on imageability.

Fig. 2a shows the correct RTs obtained in LH in each condition. Correct RTs that were more than three standard deviations away from the mean of their condition (1.4% of trials) were

rejected as outliers. The correlation between correct RTs and error rates was of +0.57 (*n.s.*), thus showing no speed-accuracy trade-off. A two-way ANOVA performed on correct RTs with frequency and confusability as factors showed a main effect of frequency [$F(1,208) = 8.8, p < 0.01$] and no confusability effect [$F(1,208) = 1.6, ns$]. The interaction between frequency and confusability was significant [$F(1,208) = 4.4, p < 0.05$]. Simple effect analysis indicated that increased lexical frequency had a large facilitatory effect with low confusability words [$F(1,208) = 13.8, p < 0.001$] but no effect with high confusability targets [$F(1,208) < 1$]. A chi-square analysis of error rates showed no significant difference between condition [$\chi^2(3) = 1.23; ns$].

Fig. 2b shows the correct RTs obtained in the neurologically intact readers. Correct RTs that were more than three standard deviations away from the mean of their condition (1.0 % of trials) were rejected as outliers. The correlation between correct RTs and error rates was of +0.13 (*n.s.*), thus showing no speed-accuracy trade-off. The ANOVA applied on correct RT's with factors of letter confusability and frequency showed a significant effect of lexical frequency [$F(1,6) = 11.3; p < 0.05$], no effect of letter confusability [$F(1,6) = 1.6, ns$], and no interaction between those two factors [$F(1,6) < 1$]. The significant lexical frequency effect indicates shorter RT's with high frequency than with low frequency targets. The analysis applied on error rates showed no main effect of letter confusability [$F(1,6) = 2.1, ns$] but a tendency for a facilitatory effect of increased lexical frequency [$F(1,6) = 4.1, p = 0.09$]. The interaction between these two factors is not significant [$F(1,6) = 1.1, ns$].

Insert Fig. 2 near here.

Experiment 3c: Imageability x confusability

Targets were 200 five-, six- and seven-letter words varying orthogonally on their imageability (low: below 2; High: more than 6 on a 1 to 7 scale) and their average letter confusability (low: below 0.43; high: 0.52 or higher). There were 50 targets in each condition. Across conditions, words were matched according to number of letters, lexical frequency, bigram frequency, and PhN size [all F's (1,196) < 1].

Fig. 3a shows the correct RTs obtained in LH in each condition of Exp. 3c. Correct RTs that were more than three standard deviations away from the mean of their condition (0.5% of trials) were rejected as outliers. The correlation between correct RTs and error rates was of +0.42 (n.s.), thus showing no speed-accuracy trade-off. A two-way ANOVA performed on correct RTs with imageability and confusability as factors showed a main effect of imageability [$F(1,180) = 15.6, p < 0.001$] and no significant confusability effect [$F(1,180) = 1.6, ns$]. The interaction between frequency and confusability was also significant [$F(1,180) = 6.7, p < 0.05$]. Simple effect analysis indicated that increased imageability had a large facilitatory effect with low confusability words [$F(1,180) = 17.4, p < 0.001$] but no effect with high confusability targets [$F(1,180) = 1.6, ns$]. A chi-square analysis of error rates showed no significant effect of imageability [$\chi^2(3) = 3.63; ns$].

Figs 4b shows the correct RTs obtained in the young neurologically intact readers in each condition. Correct RTs that were more than three standard deviations away from the mean of their condition (1.5% of trials) were rejected as outliers. The correlation between correct RTs and error rates was of +0.07 (n.s.), thus showing no speed-accuracy trade-off. The ANOVA applied on the correct RT's observed in these subjects with factors of letter confusability and imageability showed

no imageability effect [$F(1,6) < 1$], no effect of letter confusability [$F(1,6) < 1$], and no interaction between those two factors [$F(1,6) < 1$]. Thus normal subjects show no imageability effect in this task. The analysis applied on error rates showed a main effect of imageability [$F(1,6) = 6.8, p < 0.05$] and a strong trend for a letter confusability effect [$F(1,6) = 5.5, p = 0.06$]. The interaction between these two factors is however not significant [$F(1,6) = 1.2, ns$]. The main effects indicate that increased imageability and decreased letter confusability lead to a reduction of the number of errors.

Insert Fig. 3 near here.

Discussion

The present observations replicate the finding of Arguin et al. (2002) indicating that the word naming performance of neurologically intact normal readers is entirely resistant to the effect of letter confusability. Indeed, letter confusability had no impact either on the overall reading performance of these subjects, nor on the effects of high level variables they demonstrate. In contrast, the results of LH demonstrate that each of the high-level effects assessed here (PhN size, lexical frequency, and imageability) are absent with high letter-confusability target words. Examined from an alternative perspective, this interaction shows that LH suffers from a letter confusability effect only when parallel letter processing is used. We thus suggest that the use of parallel letter processing is impaired in LH because of a poor quality of the visual input when attention is spread over the entire surface of the target word. It is the quality of the visual input which is modulated by letter confusability. With low letter-confusability words, the

quality of the visual input based on parallel letter processing is sufficient to activate some high-level knowledge. However, with high letter-confusability words, the poor quality of the visual input does not permit a proper activation high-level knowledge. Given the impoverished input it provides to the lexical-orthographic system, parallel letter processing cannot reliably support overt word recognition, which forces the patient to examine the constituent letters of the target in sequence. We propose that the purpose of this sequential strategy to improve the visual quality of the orthographic input (by increasing the signal-to-noise ratio) in order to permit visual word identification. As observed in experiment 2, when this sequential strategy (possibly involving the focalisation of attention at the letter level) is used, high-level effects are decreased or eliminated.

Other authors have already proposed that a sequential strategy could eliminate high-level effects as well as the implicit reading capacities of dyslexic patients. For example, Howard (1991) has suggested that particular strategies can diminish and possibly even eliminate lexical/semantic effects (see also Behrmann, Plaut & Nelson, 1998). Farah and Wallace (1991) also noted this in relation to the presence/absence of the word superiority effect in some LBL subjects. Relatedly, Coslett et al. (1993) suggested that LBL readers must abandon their usual serial strategy to rapidly access the lexical and semantic information required to allow them to make rapid semantic or lexical decisions. We will address the theoretical implication of these observations in the general discussion.

Experiment 4: Letter confusability effect with serial letter presentation

Exp. 4 will provide a test for the hypothesis that the role of the sequential letter-by-letter strategy was to increase the quality of the visual input toward the higher-level representation

system of reading (phonology, lexicon, and semantic). If this hypothesis is correct, then the letter confusability effect should be strongly reduced or even eliminated when the lexical access is done by processing each letter sequentially. In this experiment, the methodology is the same as in Exp. 2.

Stimuli. The targets were 80 five- to seven- letters low confusability words divided equally into two conditions defined according to confusability (low : below 0,43; high : 0,52 or higher). There were 40 targets in each condition. Across conditions, words were matched pairwise according to their number of letters, lexical frequency, bigram frequency and PhN size (all $F < 1$).

Result

Sequential presentation: One data point (1.5 % of correct trials) was removed from the RT analysis because the response latency was more than three standard deviations away from the mean of its condition. An ANOVA performed on correct RTs, with letter confusability as factors showed no effect of letter confusability [$F(1,72) < 1$]. A chi-square analysis of error rates as a function of letter confusability showed no significant effect of length [$\chi^2(1) = 1.10$; ns].

Simultaneous presentation: 1 data point (1.3 % of correct trials) was removed from the RT analysis because the response latency was more than three standard deviations away from the mean of its condition. An ANOVA performed on correct RTs, with lexical frequency as factors showed main effects of frequency [$F(1,73) = 17.8$, $p < 0.001$]. Chi-square analysis of error rates as a function of letter confusability showed no significant effect of length [$\chi^2(1) = 1.04$; ns].

The results of Exp. 4 indicate that the use of a sequential strategy is useful to eliminate perceptual confusions in letter identification thereby allowing the explicit identification of the target. This finding points to an extremely important role of attentional mechanisms in the reading of letter-by-letter dyslexics. In fact, when parallel letter processing is used, the attentional resources are spread across all the letters of the word. However, the letter-by-letter strategy allows the focussing of attention on each individual letter, which, according to Yeshurun & Carrasco (1998) increases the spatial resolution of the visual system, thereby increasing the signal/noise ratio and decreasing the probability of confusing visually similar letters.

GENERAL DISCUSSION

The aim of this study was to answer two major questions regarding letter-by-letter dyslexia. 1- What is the nature of the functional impairment responsible for the incapacity of LBL dyslexics to reliably recognize words through parallel letter processing? 2- What is the function of sequential letter processing in the disorder? In continuity with Arguin et al. (2002), we have shown that three high-level variables usually associated with parallel letter processing influence LH's overt word recognition performance, but that these effects (and consequently parallel letter processing) are restricted to words constituted of low-confusability letters. It is worth underlining that although we are not the first laboratory to observe that visually similar letters may be problematic for LBL dyslexics (e.g. Karanth, 1985; Patterson and Kay, 1982; Perri, Bartolomeo & Silveri, 1996), we are the first to propose that letter confusability might be central to LBL dyslexia and that its effect may account for the breakdown of parallel letter processing.

The central purpose of experiment 1 was to show that the reading latency of LH was affected by high-level knowledge. More specifically, as usually observed in normal subjects, the reading performance of LH is improved with high PhN size, high frequency, and high imageability words. In addition, exp. 1a aimed at specifying the cause of the neighbourhood size effect. The results showed that a facilitatory effect of orthographic neighbours is essentially dependant upon PhN (orthographic neighbours that are also phonological neighbours) whereas pure orthographic neighbours have no effect. According to the data obtained in normal subjects, a facilitatory effect of PhN size would suggest a rapid access to lexical phonology (Peereman & Content, 1995). An important question remains: Does the rapid access to phonological knowledge provided with a large PhN size influence the probability of a word to be recognized in parallel? An interesting answer to this question is provided in the doctoral thesis of Marie Montant (1998). She has asked normal subject to identify briefly presented letter strings (80 msec). Using the technique of viewing position effect (see Montant, Nazir & Poncet, 1998 for the use of this technique in letter-by-letter dyslexia), she showed that phonological information facilitates parallel letter processing in visual word recognition. Thus, when the pronunciation of a string of letters was easily retrievable (known word), the reading accuracy of normal subjects with a brief exposure duration varied in an inverted U-shaped manner as a function of the initial location of ocular fixation across the spatial extent of the word, an effect which is typical of parallel processing. However, a U-shaped function of the location of fixation, which is characteristic of sequential processing, was obtained when the pronunciation of the target was difficult or impossible (as with nonwords) to retrieve. These results suggest that an adequate activation of phonological knowledge may act as a form of perceptual glue (Montant, 1998) to increase the probability of an efficient parallel processing of the target.

Exp. 2 was designed to demonstrate the plausibility of the proposed association between parallel processing and the high-level effects studied here and, more specifically, to show that these high-level effects are eliminated when words are read using a strictly sequential strategy. The results clearly show that the reading performance of LH is not influenced by the high-level variables studied when words are presented in an incremental, letter-by-letter manner that prevents parallel letter processing from occurring. Thus, it seems that the facilitatory effects of increased frequency, imageability, and PhN size may only occur when lexical access is conducted through parallel letter processing.

Exp. 3 was designed to investigate the limitations of parallel letter processing that prevent it from consistently supporting overt word recognition performance in LBL dyslexia. This investigation took, as its starting point, previous observations suggesting an impairment affecting letter identification as well as data from Arguin et al. (2002) on the interaction between letter confusability and N size. The results of Exp. 3 confirmed the cost of increased letter confusability on the overt word identification performance of LH. In particular, they showed that high-level effects occur only with low letter confusability words whereas they are not apparent with high letter confusability words. Thus, it seems that, in LH, the parallel processing of the letters in a word is possible and useful when these letters are of low confusability, but hard and/or useless when the letters are of high confusability.

These observations suggest a theory of LBL dyslexia whereby the first attempt to recognise a word is through the simultaneous parallel processing of letters, which is the default mechanism for normal literate adults. However, parallel letter processing does not reliably permit

overt word recognition in LBL dyslexia because the mechanisms involved are unable to discriminate between visually similar letters. This difficulty results in a low signal-to-noise ratio that prevents the reliable absolute identification of the target word (Arguin & Bub, 1995; Luce, 1959, 1977). This low signal-to-noise ratio obliges LBL readers to focus sequentially on each letter to avoid perceptual confusions between visually similar letters.

The results obtained in this study could be explained, albeit in a different manner, according to two types of formal models of normal reading (modular and connectionist). According to the modular dual-pathway model (DRC: Coltheart et al, 1993; 2001), only the lexical pathway can process words in parallel whereas processing in the sublexical pathway is sequential (Coltheart et al, 1993; 2001; Rastle & Coltheart, 1998, 1999). In the dual-pathway model then, the lexical frequency, imageability, and phonological effects investigated here are readily considered to be associated with parallel processing of letters. For this model, The presence of these three effects in LH is an indication that the parallel processing of letters can influence the speed of reading of dyslexics patients and this, even in tasks requiring explicit word recognition. This model is therefore entirely congruent with the above interpretation of the current findings.

An account of the present findings according to a PDP model also appears possible. In fact, connectionist models based on attractor networks (Harm & Seidenberg, in press; Hinton & Shallice, 1991; Plaut & Shallice, 1993; Plaut, Seidenberg, McClelland & Paterson, 1996) offer a very interesting single-mechanism account of our results. A key functional element in PDP models is the fact that the activation of representations in the brain is not all or none (Munakata, 2001). Thus, even if some visual deficit decreases the capacity of the cognitive system to correctly

interpret an input based on parallel letter processing, the corresponding knowledge may be partially activated nonetheless, which may in turn facilitate the recognition of the target word when a letter-by-letter strategy is applied afterwards. Thus, even if the cognitive system, because of the cerebral lesion, is initially incapable of correctly interpreting the visual input on the basis of parallel letter processing, the high-level knowledge (attractors) will gradually clean-up the signal and direct it towards its proper representational space (Plaut & Shallice, 1993). For example, in the study of deep dyslexia by Plaut and Shallice (1993), the use of semantic attractors allowed the network to minimise the effect of noise on the direct pathway (from orthography to semantic) and to eventually provide a correct interpretation of the stimulus. Within the context of connectionist networks, it is widely assumed that a general consequence of brain damage is to amplify the amount of noise in the system. According to Plaut and Shallice (see also Hinton & Shallice, 1991), high imageability words would be represented with more semantic features than low imageability words and would thus be more efficient in the activation of semantic attractors (i.e. they have a larger basin of attraction) than low imageability words, thereby accounting for the greater ease of deep dyslexic patients in reading high imageability words.

A similar logic may apply to letter-by-letter dyslexia. In this case, the visual deficit affecting parallel letter processing increases the amount of noise present in the reading pathways (from orthography to phonology and from orthography to semantic). As noted previously, we suggest that the amount of noise present in the reading system is proportional to the summed confusability of each letter in the stimulus. With low letter confusability words, the propagation of activation would be sufficiently precise to activate some phonological and semantic attractors, which would allow overt word recognition to be based on parallel letter processing some of the time (cf.

Howard, 1991), and otherwise to improve reading performance involving the compensatory sequential process. In contrast, with high confusability words, the activation is so dispersed (i.e. low signal-to-noise ratio) that attractors fail to help the reading system in the interpretation of the visual stimulus. The problem of a too low signal-to-noise ratio can be resolved however, by maximising the quality of the visual representation of the input through the sequential processing of individual letters, which possibly involves focussed attention. When this serial strategy is used, phonological and semantic activations are very precise and thus minimise the influence of phonological attractors and semantic feedback upon word identification performance. This would explain why the facilitatory effects of PhN size, lexical frequency, and imageability in LH are exclusively associated with parallel letter processing.

CONCLUSION

The present study has shown that PhN size, lexical frequency, and imageability effects are present in an LBL dyslexic, but only with low letter-confusability words and only when all the letters in the word are presented simultaneously. The elimination of the high-level effects investigated by sequential letter presentation indicates that these effects are based on a residual capacity for parallel letter processing in the patient. Moreover, the elimination of these high-level effects with high letter confusability words suggests that LBL dyslexia may rest on a letter encoding impairment that causes an excessive level of background noise in the activation of lexical-orthographic representations when letters are processed in parallel. We suggest a PDP interpretation in which phonological and semantic attractors would be sufficiently activated by parallel letter processing in LBL dyslexia to allow a subset of words with appropriate linguistic properties to be read through parallel letter processing (see Howard, 1991). However, because of

the letter encoding deficit, which would be exacerbated by high letter confusability, the orthographic input to the phonological and semantic systems generally fails to properly activate attractors, which then forces LBL patients to revert to sequential letter processing through focussed attention on individual letters in order to increase the signal-to-noise ratio, and thereby permit overt word recognition.

FOOTNOTES

¹ The fact that the word length effect in normal subjects is modulated by high-level effects such as lexical frequency and number of orthographic neighbours (Weekes, 1997) suggests that, without high-level feedback, the capacity of normal readers for parallel letter processing is limited. The rapid access to high-level knowledge thus appears necessary for the parallel processing of letters. However, difficulties in the rapid access to this knowledge could strongly alter the probability of an efficient parallel processing.

² As Arguin, Fiset and Bub (2002) pointed out, however, a problem with these studies is that they did not require overt identification of the words implicitly read.

³ This metric is based on published letter confusion matrices, which were averaged (Gilmore, Hersh, Caramazza & Griffin, 1979; Loomis, 1982; Townsend, 1971; Van Der Heijden, Malhas & Van Den Roovaart, 1984). Letter confusion matrices are only available for uppercase letters and not for lowercase letters, consequently, all the experiments in this article were conducted with stimuli printed in uppercase letters.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful for the kind collaboration offered by LH. We also thank Frédéric Gosselin and Caroline Blais for their comments on earlier draft and their invaluable help in the writing process. This research was supported by a grant from the Canadian Institute for Health Research to Martin Arguin. Martin Arguin is chercheur-boursier of the Fonds de la Recherche en Santé du Québec.

REFERENCES

- Andrews, S. (1989). Frequency and neighbourhood effects on lexical access: Activation or search? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition; 15*, 802-814.
- Andrews, S. (1992). Frequency and neighbourhood effects on lexical access: Lexical similarity or orthographic redundancy? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition; 18*, 234-254.
- Andrews, S. (1997). The effect of orthographic similarity on lexical retrieval: Resolving neighbourhood conflicts. *Psychonomic Bulletin & Review; 4*, 439-461
- Arguin, M., & Bub, D. (1993). Single-character processing in a case of pure alexia. *Neuropsychologia; 5*, 435-458.
- Arguin, M., & Bub, D. (1996). A facilitatory effect of orthographic neighbourhood size in letter-by-letter reading. *International Journal of Psychology, 31(3-4)*, 402.
- Arguin, M., Bub, D., & Bowers, J. S. (1998). Extent and limits of covert lexical activation in letter-by-letter reading. *Cognitive Neuropsychology; 15*, 53-92.
- Arguin, M., Fiset, S., & Bub, D. (2002). Sequential and parallel letter processing in letter-by-letter dyslexia. *Cognitive Neuropsychology; 19*, 535-555.

Behrmann, M., Plaut, D. C., & Nelson, J. (1998). A literature review and new data supporting an interactive account of letter-by-letter reading. *Cognitive Neuropsychology*; **15**, 7-51.

Behrmann, M., & Shallice, T. (1995). Pure alexia: A nonspatial visual disorder affecting letter activation. *Cognitive Neuropsychology*; **12**, 409-454.

Behrmann, M., Shomstein, S., Black, S. E., & Barton, J. J. S (2001). Eye movements of letter-by-letter readers during reading: Effects of word length and lexical variables. *Neuropsychologia*, **39**, 9, 983-1002.

Binder, J.R. and Mohr, J.P. (1992) The topography of callosal reading pathways. a case-control analysis. *Brain* 115, 1807–1826

Bowers, J.S., Arguin, M., & Bub, D. (1996). Fast and specific access to orthographic knowledge in a case of letter-by-letter surface alexia. *Cognitive Neuropsychology*; **13**, 525-567.

Bowers, J. S., & Bub, D., Arguin, M. (1996). A characterization of the word superiority effect in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*; **13**, 415-441.

Bub, D., & Arguin, M. (1995). Visual word activation in pure alexia. *Brain and Language*; **49**, 77-103.

Bub, D., Black, S., & Howell, J. (1989). Word recognition and orthographic context effects in a letter-by-letter reader. *Brain and Language*; **36**, 357-376.

Cohen, L., Martinaud, O., Lemer, C., Lehericy, S., Samson, Y., Obadia, M. Slachevsky, A. & Dehaene, S. (2003). Visual word recognition in the left and right hemispheres: Anatomical and functional correlates of peripheral alexia. *Cerebral Cortex*.

Coltheart, M., Davelaar, E., Jonasson, J.T., & Besner, D. (1977). Access to the internal lexicon. In S Dornic editor, *Attention and Performance VI* (pp. 535-555). London: Academic Press.

Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P., & Haller, M. (1993). Models of reading aloud: Dual-route and parallel-distributed-processing approaches. *Psychological Review*; **100**, 589-608.

Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*; **108**, 204-256.

Content, A., Mousty, P., & Radeau, M. (1990). BRULEX: A computerized lexical data base for the French language. *Année Psychologique*; **90**, 551-566.

Content, A., & Peereman, R. (1992). *Single and multiple process models of print to speech conversion.* Amsterdam: North Holland.

Coslett, H. B., & Saffran, E. M. (1989). Evidence for preserved reading in 'pure alexia'. *Brain*; **112**, 327-359.

Coslett, H. B., Saffran, E. M., Greenbaum, S., & Schwartz, H. (1993). Reading in pure alexia: The effect of strategy. *Brain*; **116**, 21-37.

Damasio, A. R., & Damasio, H. (1983). The anatomic basis of pure alexia. *Neurology*; **33**, 1573-1583.

Dejerine, J. J. (1892). Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Comptes rendus et mémoires de la société de biologie*; 61-90.

Farah, M. J., & Wallace, M. A. (1991). Pure alexia as a visual impairment: A reconsideration. *Cognitive Neuropsychology*; **8**, 313-334.

Gilmore, G. C., Hersh, H., Caramazza, A., & Griffin J. (1979). Multidimensional letter similarity derived from recognition errors. *Perception and Psychophysics*; **25**, 425-431.

Hanley, J.R., & Kay, J. (1996). Reading speed in pure alexia. *Neuropsychologia*, **34**, 1165-1174.

Harm, M.W. (1998). *Division of labor in a computational model of visual word recognition*. Unpublished doctoral dissertation, University of Southern California, Los Angeles, CA.

Harm, M., & Seidenberg, M.S. (in press). Computing the Meanings of Words in Reading: Cooperative Division of Labor Between Visual and Phonological Processes. *Psychological Review*.

Hinton, G. E., & Shallice, T. (1991). Lesioning an attractor network: Investigations of acquired dyslexia. *Psychological Review*, **98**, 74-95.

Howard, D. (1991). Letter-by-letter readers: Evidence for parallel processing. In D Besner, GW Humphreys editors, *Basic Processes in Reading: Visual Word Recognition* Hillsdale, NJ: Erlbaum.; 34-76.

Karanth, P. (1985). Dyslexia in a Dravidian language. In K.E. Patterson, J.C. Marshall, &M. Coltheart (Eds.), *Surface dyslexia* (pp. 251–260). Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates Ltd.

Kay, J., & Hanley, R. (1991). Simultaneous form perception and serial letter recognition in a case of letter-by-letter reading. *Cognitive Neuropsychology*; **8**, 249-273.

Kwantes, P.J., & Mewhort, D.J.K. (1999). Evidence for sequential processing in visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology; Human Perception and Performance*; **25**, 376-381.

Loomis, J. M. (1982). Analysis of tactile and visual confusion matrices. *Perception and Psychophysics; 31*, 41-52.

Luce, R. D. (1959). *Individual Choice Behavior*. New York: Wiley.

Luce, R. D. (1977). The choice axiom after twenty years. *Journal of Mathematical Psychology; 15*, 215-233.

McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception Part 1: An account of basic findings. *Psychological Review; 88*, 375-407.

McKeeff T.J., & Behrmann M. (in press a). Relating Naming Latency and Extent of Covert Processing in Pure Alexia. *Cognitive Neuropsychology*.

McKeeff T.J. & Behrmann M. (in press b). Pure alexia and covert reading: evidence from stroop tasks. *Cognitive Neuropsychology*.

Montant, M. (1998). Les étapes de traitement pré-lexicales dans la reconnaissance des mots écrit : approche comportemental et neuropsychologique. Unpublished doctoral dissertation, Université de Provence, Marseille, France.

Montant, M. & Behrmann, M. (2001). Phonological activation in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*, in press.

Montant, M., Nazir, T.A., & Poncet, M. (1998). Pure alexia and the viewing position effect in printed words. *Cognitive Neuropsychology*; **15**, 93–140.

Munakata, Y. (2001). Graded representations in behavioral dissociations. *Trends in Cognitive Sciences*, **5**, 309-315.

Patterson, K., & Kay, J. (1982). Letter-by-letter reading: Psychological descriptions of a neurological syndrome. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*; **34A**, 411-441.

Peereman, R., & Content, A. (1995). Neighbourhood size effect in naming: Lexical activation or sublexical correspondences? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*; **21**, 409-421.

Peereman, R., & Content, A. (1997). Orthographic and phonological neighbourhoods in naming: Not all neighbours are equally influential in orthographic space. *Journal of Memory & Language*; **37**, 382-410.

Perri, R., Bartolomeo, P., & Silveri, M.C. (1996). Letter dyslexia in a letter-by-letter reader. *Brain and Language*, **53**, 390–407.

Plaut, D. (1999). A connectionist approach to word reading and acquired dyslexia: Extension to sequential processing. *Cognitive Science*; **23**, 543-568.

Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M., & Patterson, K. E. (1996). Understanding normal and impaired word reading: Computational principles in quasi-regular domains. *Psychological Review*, **103**, 56-115.

Plaut, D. C., & Shallice, T. (1993). Deep dyslexia: A case study of connectionist neuropsychology. *Cognitive Neuropsychology*, **10**, 377-500.

Price, C.J., & Humphreys, G.W. (1992). Letter-by-letter reading? Functional deficits and compensatory strategies. *Cognitive Neuropsychology*, **9(5)**, 427-457.

Rastle, K., & Coltheart, M. (1998). Whammies and double whammies : The effect of length on nonwords reading. *Psychonomic Bulletin and Review*, **5**, 277-282.

Rastle, K., & Coltheart, M. (1998). Serial and strategic effects in reading aloud. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **25**, 482-503.

Reuter-Lorenz, P. A., & Brunn, J. L. (1990). A prelexical basis for letter-by-letter reading: A case study. *Cognitive Neuropsychology*, **7**, 1-20.

Riddoch, M. J., & Humphreys, G. W. (1993). *BORB: The Birmingham Object Recognition Battery*. Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates Ltd.

Saffran, E.M., & Coslett, H.B. (1998). Implicit vs. letter-by-letter reading in pure alexia : A tale of two systems. *Cognitive Neuropsychology*, **18**, 141-165.

Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, **96**(4), 523-568.

Sekuler, E., & Behrman, M. (1996). Perceptual cues in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*, **13**, 941-974.

Shallice, T., & Saffran, E. (1986). Lexical processing in the absence of explicit word identification: Evidence from a letter-by-letter reader. *Cognitive Neuropsychology*; **4**, 429-458.

Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. In WG Koster editor, *Attention and Performance II Acta Psychologica*; **30**, 276-315.

Strain, E., & Herdman, C. M. (1999). Imageability effects in word naming: An individual differences analysis. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, **53**, 347-359.

Strain, E., Patterson, K., & Seidenberg, M. S. (1995). Semantic effects in single-word naming. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, **21**, 1140-1154.

Treiman, R., Mullennix, J., Bijeljac-Babic, R., & Richmond-Welty, E.D. (1995). The special role of rimes in the description, use, and acquisition of English orthography. *Journal of Experimental Psychology: General*; **124**, 107–136.

Townsend, J. T. (1971). Theoretical analysis of an alphabetic confusion matrix. *Perception and Psychophysics*; **9**, 40-50.

Van Der Heijden, A. H. C., Malhas, M. S. M., & Van Den Roovaart, B. P. (1984). An empirical interletter confusion matrix for continuous-line capitals. *Perception and Psychophysics*; **35**, 85-88.

Yeshurun, Y. & Carrasco, M. (1998). Attention improves or impairs visual performance by enhancing spatial resolution. *Nature*, **396**, 72-75.

Weekes, B. S. (1997). Differential effects of number of letters on word and nonword naming latency. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*; **50A**, 439-456.

TABLE

Table 1. Reaction times (in msec) for LH and the normal control subjects in the naming and lexical decision tasks as a function of word length.

Task and string length	<u>LH</u>	<u>control</u>
NAMING		
4 letters	3456	470
5 letters	3728	465
6 letters	4314	470
7 letters	5013	488
LEXICAL DECISION		
4 letters	4300	554
5 letters	4798	580
6 letters	5669	596
7 letters	6008	585

In the lexical decision task, the data from words and pseudowords were combined

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. a) Average correct response times (msec) in LH and b) in young neurologically intact readers as a function of the PhN size and letter confusability (Exp. 2a).

Fig. 1. a) Average correct response times (msec) in LH and b) in young neurologically intact readers as a function of lexical frequency and letter confusability (Exp. 2b).

Fig. 2. a) Average correct response times (msec) in LH and b) in young neurologically intact readers as a function of imageability and letter confusability (Exp. 2c).

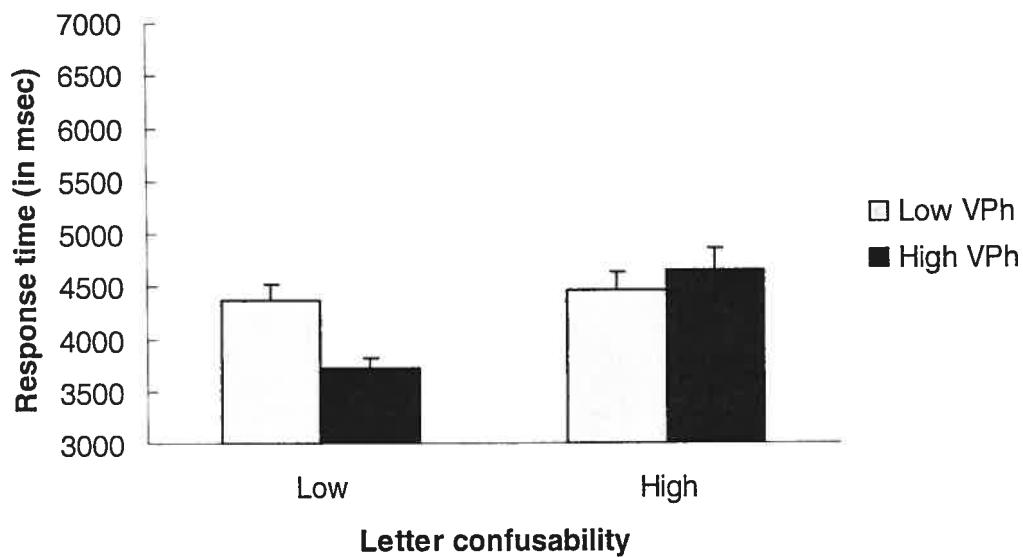
FIGURES

Fig. 1a — Fiset, Arguin & McCabe

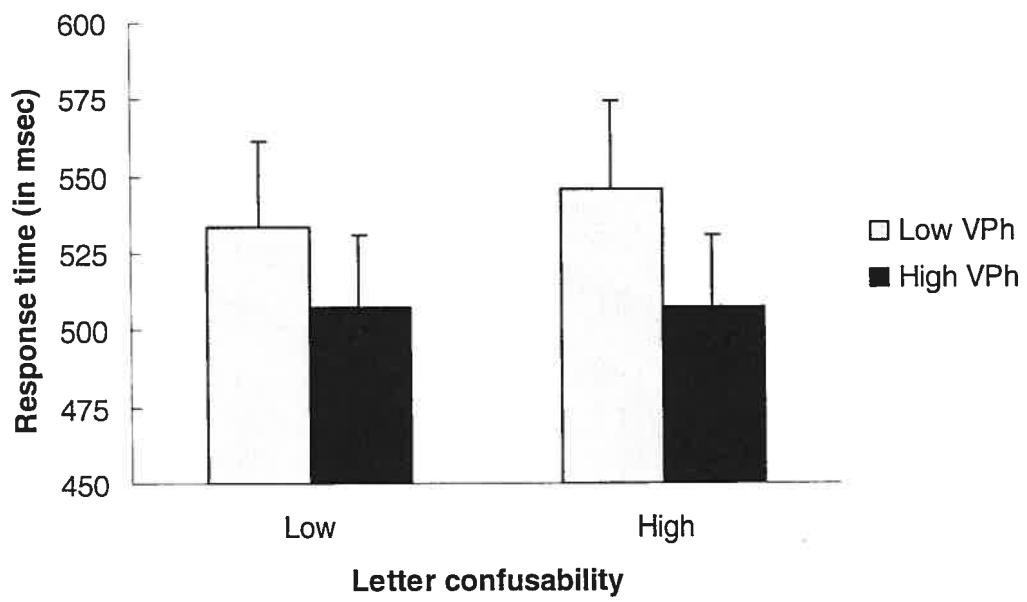


Fig. 1b — Fiset, Arguin & McCabe

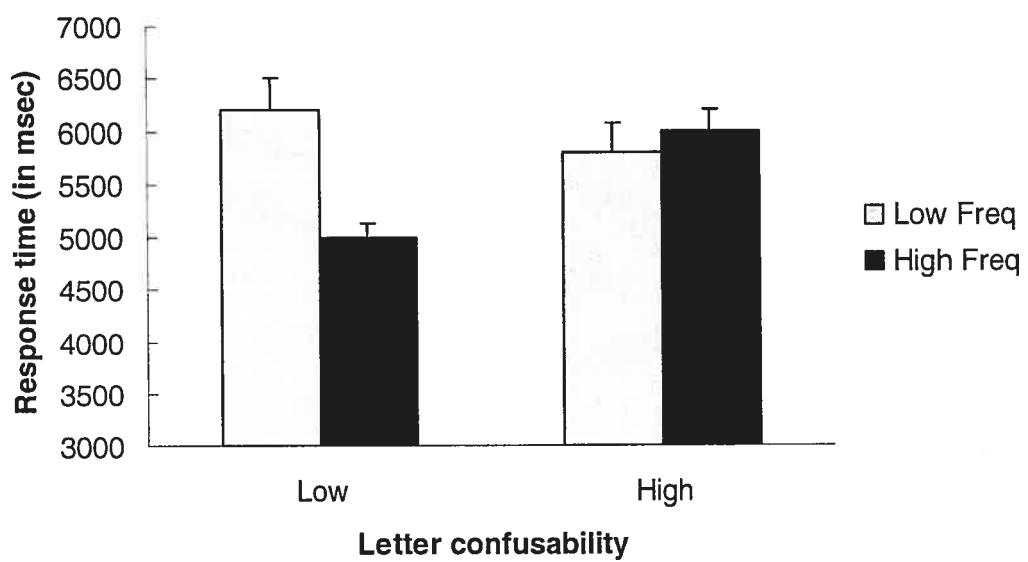


Fig. 1a — Fiset, Arguin & McCabe

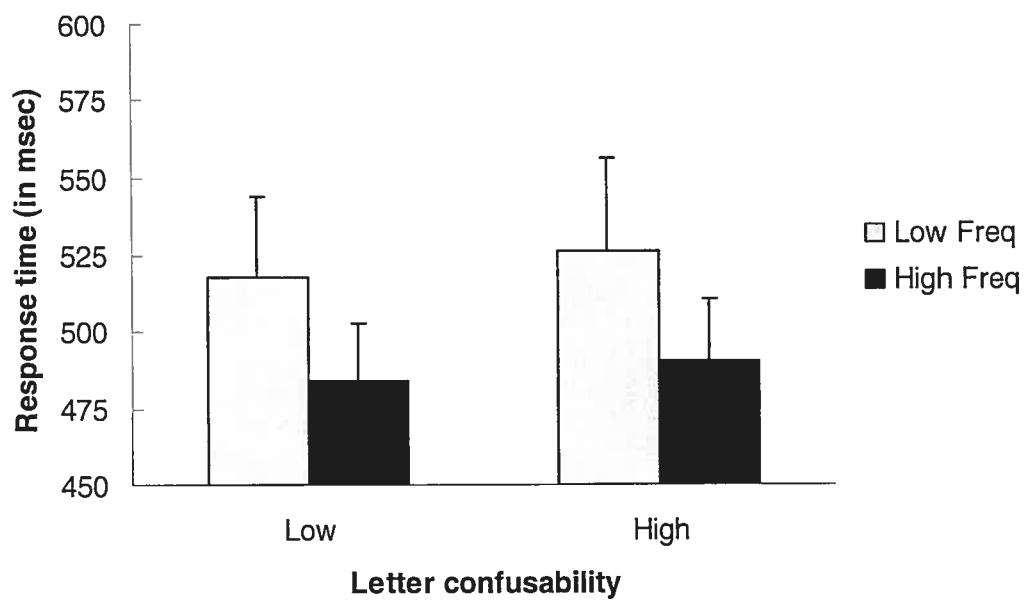


Fig. 1b — Fiset, Arguin & McCabe

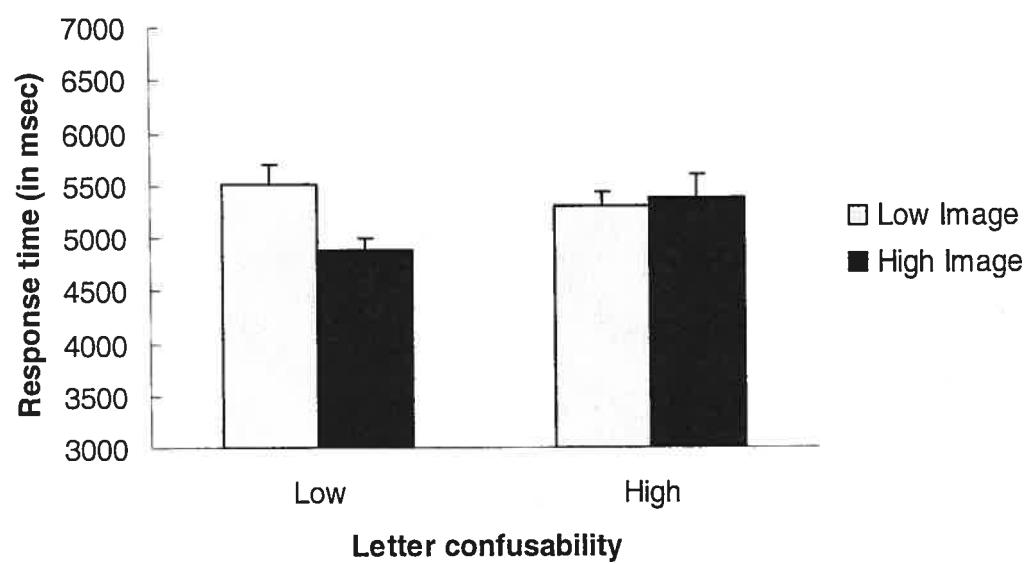


Fig. 2a — Fiset, Arguin & McCabe

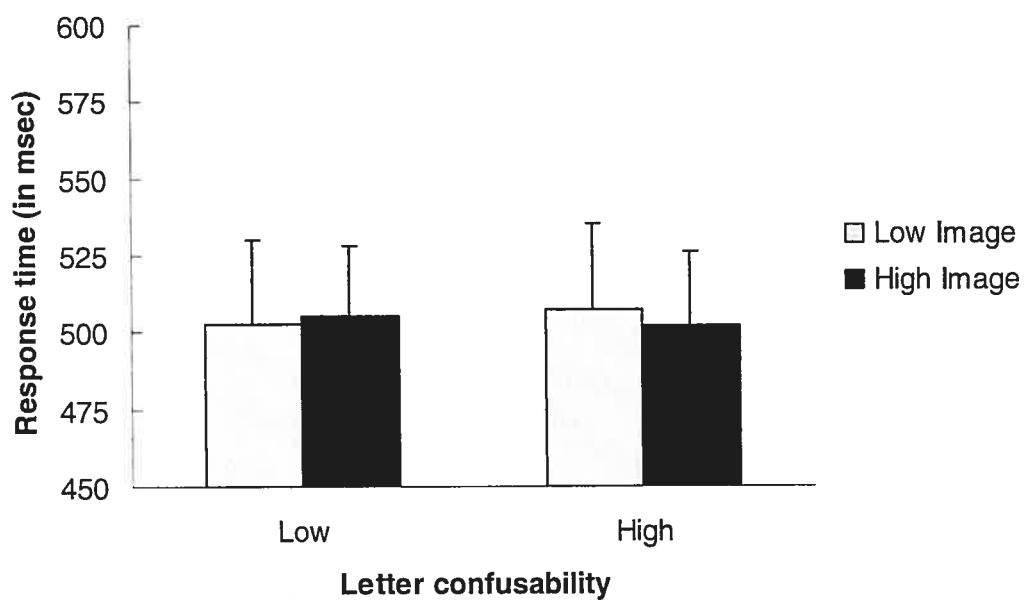


Fig. 2b — Fiset, Arguin & McCabe

CHAPITRE TROISIÈME

ARTICLE 2

Fiset,D., Arguin, M., Bub, D.N., Humphreys, G.W. & Riddoch, J. (en preparation).
Letter-by-letter dyslexia : the word length effect revisited

LETTER-BY-LETTER DYSLEXIA: THE WORD LENGTH EFFECT REVISITED

¹Daniel Fiset, ¹Martin Arguin, ²Daniel N. Bub, ³Glyn W. Humphreys & ³Jane Riddoch

¹ *Groupe de Recherche en Neuropsychologie Expérimentale et Cognition, Département de Psychologie, Université de Montréal, CP 6128, succ. Centre-ville, Montréal H3C 3J7, CANADA and Centre de Recherche, Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal.*

² *Department of Psychology, University of Victoria, Victoria, CANADA*

³ *Department of Psychology, University of Birmingham, Birmingham, UK*

Correspondence should be addressed to MA (e-mail: [REDACTED])

ABSTRACT

The diagnosis of letter-by-letter (LBL) dyslexia is based on the observation of a substantial and monotonic increase of word naming latencies with the number of letters in the stimulus. This is interpreted as indicating that word recognition in LBL dyslexia depends on the sequential identification of individual letters. We show, in seven LBL patients, that the word length effect can be eliminated if words of different lengths are matched on the sum of the confusability (visual similarity between a letter and the remainder of the alphabet) of their constituent letters. Three additional experiments are reported which demonstrate that the reading performance of LBL patients in these conditions truly reflects parallel letter processing. These findings demonstrate that explicit word recognition does not always require sequential letter encoding in LBL dyslexia and that a letter processing impairment is fundamental in causing the disorder.

INTRODUCTION

In our society, the cognitive faculty of reading is clearly a domain of expertise. The average English reader will have read more than 100 millions words at 25 years of age¹. This practice allows us to extract the diagnostic visual information² needed to identify words in less than 250 ms³ and to read words of different lengths at an invariant rate (approximately 530 ms for words comprising 3 to 6 letters)⁴ which suggests that skilled readers have the capacity to recognize several letters simultaneously. However, a lesion within the temporo-occipital region of the left hemisphere^{5,6} can impair this parallel processing of letters and dramatically affect reading capacities. The resultant reading impairment, called pure alexia or letter-by-letter (LBL) dyslexia, has been described for the first time by Dejerine in 1892^{7,8} and is characterized by an abnormally large word length effect on word reading latencies (more than 300 ms per letter).

Despite 100 years of investigation, LBL dyslexia still lacks a clear and coherent functional account of why patients abandon the parallel letter processing to use a sequential strategy. In the present paper, we uncover a fundamental factor, namely the visual similarity among letters, which almost completely accounts for the word length effect that is diagnostic of LBL dyslexia. Paradoxically, we also show that letter similarity has strictly no impact on the single letter identification performance or the letter processing rate of dyslexic patients. Apart from constituting a major breakthrough for our understanding of LBL dyslexia, the present observations also inform on the poorly studied, but crucial issue of the vision-language interface in normal reading.

While sequential letter identification defines LBL reading, parallel letter processing nevertheless contributes to overt reading performance. Indeed, most dyslexics show a facilitatory effect with

increased lexical frequency, number of orthographic neighbours (Nsize ; orthographic neighbours of a letter string are words of the same length that differ from it by just one letter⁹) and imageability in word naming¹⁰⁻¹⁴. These high-level effects are observed in LBL dyslexics when all the letters of a word are presented simultaneously but they are abolished when letters are presented sequentially (DF, MA & McCabe, submitted). This suggests that parallel letter processing is responsible for high-level effects in LBL dyslexia.

However, even with normal (simultaneous) visual presentation, the capacity of parallel letter processing in LBL dyslexia is severely limited and it does not apply to all words. Indeed, Arguin and coll.¹² have reported that the visual similarity - a factor referred to as letter confusability (letter confusability is determined from empirical letter confusion matrices obtained in previous studies conducted in neurologically intact observers¹⁵⁻¹⁸; ranging from 0.24 (L) to 0.73 (B) with an average of 0.48) - between each constituent letter of a word and the remaining letters of the alphabet determines whether parallel processing affects reading performance. Specifically, the impact of parallel letter processing on LBL reading occurs with low letter-confusability words but is eliminated with high letter-confusability words. This influence of letter confusability is not normal however, since this factor has absolutely no effect on the reading performance of neurologically intact readers¹².

The power of letter confusability in blocking the contribution of parallel letter processing to reading performance in LBL dyslexia suggests that the disorder results from a letter encoding impairment that prevents parallel processing from reliably supporting overt word recognition, thereby forcing the compensatory sequential letter processing that is characteristic of the disorder¹². If this interpretation is correct, then the impact of letter confusability on the reading performance of LBL

dyslexics should extend beyond blocking high-level effects (i.e. lexical frequency, imageability, and Nsize). In particular, we should also expect letter confusability to modulate the defining feature of the disorder itself, namely the word length effect.

The modulation of high-level effects by letter confusability suggests that letter confusability may determine the probability of a word to be overtly identified through the parallel processing of its letters (see Howard, 1991; for evidence supporting this possibility¹⁹). Relatedly, it may also be noted that, on average, as word length increases, so does the sum of the confusability of its constituent letters. The implication is that the probability of overt word recognition through parallel letter processing in LBL dyslexia should decrease with increasing word length. Thus, strictly speaking, it appears possible that the word length effect in LBL dyslexia is not determined exclusively by the number of letters in a word, but rather by the overall confusability of its letter content.

The account of letter-by-letter dyslexia we propose is relatively straightforward. It assumes that patients initially attempt to recognise words through the parallel processing of letters, which is the normal default mechanism for word recognition. However, the effectiveness of this process is altered by brain damage, which causes uncertainty with respect to letter identities. Our proposal is that this uncertainty is highly and positively correlated with the summed confusability of the letters in the word and that it determines the probability that the parallel process fails (i.e. does not satisfy the signal-to-noise ratio criterion required for unique word identification²⁰⁻²²). If parallel processing fails, the subject must then rely on a sequential letter processing strategy, which would decrease the amount of noise at the letter recognition level, possibly through a collaboration of focussed attention. It should be emphasised that the failure of parallel processing need not entirely prevent

the activation of high-level knowledge, which may help letter recognition through feedback and thus decrease the word length effect¹⁴.

The above theory predicts that if words of different lengths are matched on their average letter-confusability content (i.e. summed confusability / number of letters in the word) or if letter confusability is left uncontrolled (as is usually the case in studies of LBL dyslexia), then a clear and reliable word length effect should occur systematically in all LBL patients. On the other hand, if words of different lengths are matched on the summed confusability of their constituent letters, our account predicts a markedly reduced word length effect. These predictions are assessed in Exp. 1 in a group of seven LBL dyslexics.

Result

Exp. 1: Standard word naming. The results of Exp. 1 show that the word length effect diagnostic of LBL dyslexia is greatly diminished in all our LBL patients if words of different lengths are matched on the summed confusability of their constituent letters (fig. 1). On average, the slope of the word length effect is of 645 ms/letter when words of different lengths are matched on average letter confusability while it is reduced to a non-significant – 4 ms/letter when words of different lengths are matched on summed letter confusability. These finding are consistent with our theory that the probability that parallel letter processing can support overt word recognition in LBL dyslexia is largely determined by the summed letter confusability of a word and that this factor is greatly responsible for the word length effect that is diagnostic of the disorder.

An alternative account of the results of Exp. 1, whereby word recognition is always performed in a strictly letter-by-letter manner remains possible, however. Indeed, the rate of serial letter

processing may be a direct linear function of the confusability of the individual letters. With words of different lengths matched on average letter confusability, this would mean a comparable sequential letter processing rate across word lengths and therefore a linear increase of RTs with length. Conversely, when words of different lengths are matched on their summed letter confusability, the average confusability of letters in the word decreases with increasing word length. This would imply a sequential processing rate that is an inverse function of word length, and therefore an invariant reading latency across word lengths. This alternative account of Exp. 1 appears unlikely since a previous study¹² has shown that the rate of serial letter processing for word naming in LBL dyslexia is entirely unaffected by average letter confusability. Nevertheless, this alternative view was tested directly in the three control experiments.

The following experiments examined whether letter confusability affects serial or parallel letter processing. To answer this question, the letter confusability effect was assessed in our LBL patients in tasks involving the identification of single letters shown either in isolation or in a word context.

Exp. 2: Single letter naming. Six of our seven patients (WR was unavailable for this experiment) identified every letter of the alphabet presented in isolation and in random order ten times each. The correlation between the confusability of a letter and the time required to identify it failed to reach significance in every patient (DK : $r = -0.03, ns$; DM : $r = 0.07, ns$; EL $r = 0.09, ns$; HJA : $r = 0.04, ns$; IH : $r = 0.07, ns$; LH : $r = 0.06, ns$). Even when comparing the RTs for the five letters with the highest confusability to the five letters with the lowest (mean RTs of 770 and 790 ms, respectively), no patient showed a significant confusability effect (DK : $[F(1, 96) < 1]$; DM : $[F(1, 92) < 1]$; EL $[F(1, 93) < 1]$; HJA : $[F(1, 95) < 1]$; IH : $[F(1, 93) < 1]$; LH : $[F(1, 87) = 1.8, ns]$).

These observations are incongruent with an account of the results of Exp. 1 based on a modulation of serial processing rate by letter confusability.

Exp. 3: Letter naming in a word context. It could be argued that the conditions of Exp. 2 do not pertain to letter identification within a word context because individually presented letters do not suffer from the lateral masking caused by neighbouring letters that occurs with letter strings. To counter this argument, the time to identify each individual letter when shown within the context of the words used in Exp. 1 was obtained in each of our seven LBL dyslexics. Total RTs for each word were calculated by adding the RTs for each of their letters. A significant word length effect was obtained on these summed RTs in all patients and for both word lists (fig. 2). The average slope of the word length effect is 879 ms/letter when matching is performed on average letter confusability, and 774 ms/letter with matching based on summed confusability. Most importantly, no patient showed a word length effect that varied significantly across matching conditions. These observations indicate that single-letter identification is impervious to letter confusability in LBL dyslexics, even within a stimulus context favourable to lateral masking. Thus, again, our findings fail to support an account of the results of Exp. 1 based on a modulation of the rate of sequential letter processing by letter confusability.

The latter two experiments involved static recognition while, by definition, the sequential letter-by-letter strategy implies a dynamic process. It is thus possible that a letter confusability effect may occur in the letter identification performance of LBL dyslexics only when the rapid sequential processing of letters is required. The following experiment assessed this possibility.

Exp. 4: Serial reading of distorted words. The words used in Exp. 1 served again in a word naming task, but this time with their consecutive letters displayed on alternating lines. This stimulus format breaks the normal visual letter sequence in a word, and thus reliably prevents parallel processing, thereby forcing a sequential letter-by-letter processing strategy. The average slopes for the word length effect are of 628 ms/letter and of 732 ms/letter when words of different lengths are matched on average vs. summed letter-confusability, respectively. No patient showed a significant change in the magnitude of the word length effect across matching conditions (fig. 3). These findings indicate that the rate of serial letter processing in the recognition of our visually altered words is resistant to a manipulation of letter confusability. As was the case for the previous control experiments, the results fail to support an account of Exp. 1 that implies a rate of sequential letter processing in LBL dyslexia that is (even partially) determined by letter confusability.

Discussion

The results of Exp. 1 demonstrate that the key determinant of the word length effect that is diagnostic of LBL dyslexia is not the number of letters in the word, but instead the summed confusability of its constituent letters. This influence of letter confusability on reading performance is not normal since this factor has absolutely no effect in neurologically intact readers¹². Moreover, the impact of letter confusability in LBL dyslexics is restricted to conditions that may involve parallel letter processing. Thus, LBL dyslexics show no impact of letter confusability in tasks that require the processing of single letters, either individually (Exps. 2 and 3) or in a sequence (Exp. 4).

These observations point to a theory of LBL dyslexia whereby patients initially attempt to recognise words through the parallel processing of letters, which is the normal default mechanism for word recognition. This first attempt is proposed as responsible for implicit reading phenomena²³⁻²⁷, and for the high-order effects discussed in the introduction. Clearly, however, parallel letter processing cannot always permit overt word recognition in LBL dyslexia. A likely reason for this difficulty is that the mechanisms involved in parallel letter processing in LBL patients fail to provide a definite discrimination between the constituent letters of the target and other, visually similar letters. Based on the probability summation hypothesis²⁸, the probability of accurate word recognition should be equal to the sum of the probabilities for each letter to be recognized through a parallel process. This means that the LBL reader's threshold for word identification will be a function of the signal-to-noise ratio for each letter in the stimulus. It would be because this signal-to-noise ratio is especially low when attention is spread over the entire surface of the target word that the reliable absolute identification of the target word through parallel processing is prevented in LBL dyslexia²⁰⁻²².

From this view, sequential processing through focussed attention on individual letters would serve to increase the signal-to-noise ratio for orthographic activation, and thereby permit overt word recognition. Congruently, the results of Exps. 2-4 show that the processing of individual letters through focussed attention is entirely impervious to the negative impact of the visual similarity among letters. This suggests that whereas parallel processing provides ambiguous information to lexical-orthographic representations about the constituent letters of the target word, sequential letter processing can provide clear and decisive information in this regard.

An important unresolved issue concerns the cause of the letter confusability effect in letter-by-letter readers. Recent functional neuroimaging studies may provide a tentative answer to this question. Indeed, several investigations have shown that a region within the left fusiform gyrus, which is known to be lesioned in letter-by-letter dyslexia²⁹, may be concerned with the visual recognition of individual letters³⁰, of letter sequences^{3,31-33}, or of other stimuli having visual properties similar to letters³⁴. A lesion in this cortical region could disrupt the letter-by-letter reader's ability to visually process letters, thereby forcing the patient to use alternative, less efficient neural systems for the processing of such information. If this interpretation is correct, then the use of a compensatory, non-expert system for reading would account for the low signal-to-noise ratio in orthographic encoding which is signalled by the letter confusability effect. Letter-by-letter readers would therefore have to use a serial letter recognition strategy in order to improve the quality of the visual input that enters the seemingly intact higher level processing components involved in visual word recognition (i.e., lexical, phonological, semantic). Further research will be needed to assess this hypothesis.

The present findings also inform on the importance of the vision/language interface in reading as well as on the importance of the feedback of linguistic knowledge onto perceptual processes in reading. Until now, we emphasised the importance of the quality of the visual signal for the efficiency of the parallel letter processing in word recognition. However, the interactions observed between the verbal knowledge (top-down) and the visual signal (bottom-up) should also be taken into account. In fact, results obtained in normal subjects suggest the importance of this interactivity. For example, as mentioned in the introduction, the reading speed of normal subjects is not modulated by the number of letters, at least for short familiar words⁴. However, this capacity for parallel processing remains limited, even in normal subjects. In fact, normal readers show a

reliable string length effect in pseudo-word reading⁴. This difference between familiar words and pseudo-words suggests that normal readers may use lexical, semantic, and phonological information to increase the signal-to-noise ratio in orthographic processing. In contrast, the brain lesion in LBL dyslexia increases the sensitivity to visual factors, such as letter confusability, and thus interferes with the access to high-level knowledge. The severity of this problem would increase with word length, given that longer words are normally associated with increased summed letter confusability, thereby causing the word length effect characteristic of LBL dyslexia. Long words thus have less opportunity to activate high-level knowledge to be read in parallel. It is thereby only when the summed letter confusability is controlled that words of different lengths activate equally high-level knowledge.

In conclusion, we propose that the presence of a substantial letter confusability effect in letter string recognition is a sufficient condition to account for the inefficiency of parallel letter processing in LBL dyslexia. In this perspective, the compensatory letter-by-letter strategy would serve to avoid confusions between visually similar letters by increasing the signal/noise ratio in orthographic encoding.

Methods

CASE REPORTS

Six of the seven patients described here have taken part in other published or submitted studies. We invite the reader to refer to these studies for additional clinical details. Only the localisation of the lesion and the effects of word length and letter confusability on word recognition performance are reported here (see table 1).

PROCEDURE

Stimuli: Two word lists were created which served in Exps. 1, 3 and 4. Both were made of five-, six-, or seven-letter words (for LH, 60 items/condition; for IH and WR, 50 items/condition; for the other patients, 40 items/condition) matched across lengths on bigram and lexical frequencies and on Nsize. In addition, for one list, words of different lengths were matched on the average confusability of their constituent letters whereas matching for the other list was based on summed letter confusability.

Word naming task (Exps. 1 and 4): Each subject was required to read each item aloud as rapidly as possible while avoiding errors. On each trial, a fixation star appeared for 500 ms at the centre of the computer screen, followed by a word, which remained visible until the subject responded. All stimuli appeared in black over a white background and were printed in Geneva 24-point bold font (or in Courier New 24-point bold for LH). The experimenter registered the subject's response and triggered the next trial by a key press. Each RT was measured from stimulus onset by a voice-key triggered by the subject's oral response. Both word lists (average and summed confusability) were intermixed in a single list to avoid strategic control of the process mediating reading. In Exp. 1, words were printed in a normal format. In Exp. 4, consecutive letters were displayed on alternating lines.

Letter naming task (Exps. 2 and 3): In Exp. 2, the procedure was the same as in Exp. 1 except that the target was a single letter. The letters of the alphabet were presented 10 times each in a random order. In Exp. 3, the fixation star (for 500 ms) was followed by an arrow that appeared just above the location of the target letter to follow and remained visible until the subject responded. A word appeared 500 ms after the onset of the arrow and the subject's task was to name the letter

pointed by the arrow as rapidly as possible while avoiding errors. Each RT was measured from stimulus onset by a voice-key triggered by the subject's oral response.



Acknowledgement

We are grateful for the kind collaboration offered by the patients studied here as well as to Marlene Behrmann for allowing access to EL and DK. This research was supported by a grant from the Canadian Institute for Health Research to Martin Arguin. Martin Arguin is chercheur-boursier of the Fonds de la Recherche en Santé du Québec.



References

1. Geisler, W., & Murray, R. Practice doesn't make perfect. *Nature* 423, 696-697 (2003).
2. Gosselin, F., & Schyns, P.G. RAP: A new framework for visual categorization. *Trends Cogn. Sci.* 6, 70-77 (2002).
3. McCandliss B.D., Cohen L., & Dehaene S. The Visual Word Form Area: Expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends Cogn. Sci.* 7, 293-299 (2003).
4. Weekes, B. S. Differential effects of number of letters on word and nonword naming latency. *Q. J. Exp. Psychol. A* 50, 439-456 (1997).
5. Binder, J.R., & Mohr, J.P. The topography of callosal reading pathways. A case-control analysis. *Brain*. 115, 1807-1826 (1992).
6. Damasio, A. R., & Damasio, H. The anatomic basis of pure alexia. *Neurology*. 33, 1573-1583 (1983).
7. Dejerine, J. J. Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Comptes Rendus et Mémoires de la Société de Biologie*. 61-90 (1892).
8. Bub, D.N., Arguin, M., & Lecours, A.R.. Jules Dejerine and his interpretation of pure alexia. *Brain Lang.* 45, 531-559 (1993).
9. Coltheart, M., Davelaar, E., Jonasson, J.T., & Besner, D. Access to the internal lexicon. In S Dornic editor, *Attention and Performance VI* (pp. 535-555). London: Academic Press (1977).
10. Arguin, M., & Bub, D. A facilitatory effect of orthographic neighborhood size in letter-by-letter reading. *Int. J. Psychol.* 31, 402 (1996).

11. Arguin, M., Bub, D., & Bowers, J. S. Extent and limits of covert lexical activation in letter-by-letter reading. *Cognit. Neuropsychol.* 15, 53-92 (1998).
12. Arguin, M., Fiset, S., & Bub, D. Sequential and parallel letter processing in letter-by-letter dyslexia. *Cognit. Neuropsychol.* 19, 535-555 (2002).
13. Montant, M., & Behrmann, M. Phonological activation in pure alexia. *Cognit. Neuropsychol.* 18, 697-727 (2001).
14. Behrmann, M., Plaut, D. C., & Nelson, J. A literature review and new data supporting an interactive account of letter-by-letter reading. *Cognit. Neuropsychol.* 15, 7-51 (1998).
15. Gilmore, G. C., Hersh, H., Caramazza, A., & Griffin J. Multidimensional letter similarity derived from recognition errors. *Percept. Psychophys.* 25, 425-431 (1979).
16. Loomis, J. M. Analysis of tactile and visual confusion matrices. *Percept. Psychophys.* 31, 41-52 (1982).
17. Townsend, J. T. Theoretical analysis of an alphabetic confusion matrix. *Percept. Psychophys.* 9, 40-50 (1971).
18. Van Der Heijden, A. H. C., Malhas, M. S. M., & Van Den Roovaart, B. P. An empirical interletter confusion matrix for continuous-line capitals. *Percept. Psychophys.* 35, 85-88 (1984).
19. Howard, D. Letter-by-letter readers: Evidence for parallel processing. In D Besner, GW Humphreys editors, *Basic Processes in Reading: Visual Word Recognition* Hillsdale, NJ: Erlbaum,: 34-76 (1991).

20. Arguin, M., & Bub, D. Priming and response selection processes in letter classification and identification tasks. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 21, 1199-1219 (1995).
21. Luce, R. D. *Individual Choice Behavior*. New York: Wiley (1959).
22. Luce, R. D. The choice axiom after twenty years. *J. Math. Psych.* 15, 215-233 (1977).
23. Shallice, T., & Saffran, E.M. Lexical processing in the absence of explicit word identification: Evidence from a letter-by-letter reader. *Cognit. Neuropsychol.* 3, 429-458 (1986).
24. Coslett, H. B., & Saffran, E. M. Evidence for preserved reading in 'pure alexia'. *Brain*. 112, 327-359 (1989).
25. Coslett, H. B., Saffran, E. M., Greenbaum, S., & Schwartz, H. Reading in pure alexia: The effect of strategy. *Brain*. 116, 21-37 (1993).
26. McKeeff T.J., & Behrmann M. Relating Naming Latency and Extent of Covert Processing in Pure Alexia. *Cognit. Neuropsychol.* (in press).
27. McKeeff T.J. & Behrmann M. Pure alexia and covert reading: evidence from stroop tasks. *Cognit. Neuropsychol.* (in press).
28. Pelli, D. G., Farell, B., & Moore, D. C. The remarkable inefficiency of word recognition. *Nature* 423, 752-756 (2003).
29. Cohen, L. et al. Visual word recognition in the left and right hemispheres: Anatomical and functional correlates of peripheral alexias. *Cereb. Cortex.* (in press).
30. Polk, T.A. et al. Neural specialization for letter recognition. *J. Cogn Neurosci.* 14, 145-159 (2002).

31. Cohen, L. 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*. 123, 291-307 (2000).
32. Cohen, L. et al. Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*. 125, 1054-1069 (2002).
33. Polk, T.A., & Farah, M.J. fMRI evidence for an abstract, not perceptual, word form area. *J. Exp. Psychol. Gen.* 131, 65-72 (2002).
34. Steingrimsson, R., Majaj, N. J., & Pelli, D. G. Where are letters processed and learned? Neural specialization for letter processing under different learning conditions. *Perception*. 32, supplement (2003).
35. Osswald, K., Humphreys, G.W., & Olson, A. Words are more than the sum of their parts: evidence for detrimental effects of word-level information in alexia. *Cognit. Neuropsychol.* 19, 675-695 (2002).
36. Humphreys, G. W., & Riddoch, M. J. (1987). To see but not to see: A case of visual agnosia. Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates Ltd.

TABLE 1: Short description of our seven LBL patients. This table contains the magnitude of the diagnostic word length effect, the confusability effect and the localisation of the lesion for each patient. See the cited published articles for more details.

Case	Word length effect (ms / letter)	Letter confusability effect (in ms)	Localisation of the lesion	Publication reporting details on patient
DK	400	280	left occipital lobe lesion (CT scan)	14,26
DM	410	500	Lesion of the left medial and inferior occipitotemporal gyrus (MRI)	35
EL	405	480	Lesions of the left peristriate infero-temporal, postero-lateral temporal and the dorsal parietal cortex (CT scan)	13,14,26,27
HJA	600	1300	bilateral lesions of the inferior temporal, lateral occipitotemporal, fusiform, and lingual gyrus (MRI)	36
IH	550	500	left temporo-occipital lesion (neurological examination)	10,11,12
LH	550	600	left temporal-occipital encephalomalacia (MRI)	DF, MA & McCabe (submitted)
WR	750	850	left temporo-occipital lesion (neurological examination)	No publication

Table 1– Fiset, Arguin, Bub, Humphreys & Riddoch

Figure legends

Figure 1. Average RTs for the group of patients in Exp. 1. The results of each patient were analysed individually. All patients showed a significant interaction of word length and matching condition (average vs. summed confusability) (DK : $F(2, 221) = 4.2, p < 0.05$; DM : $F(2, 227) = 4.3, p < 0.05$; EL $F(2, 217) = 16.1, p < 0.001$; HJA : $F(2, 215) = 6.8, p < 0.005$; IH : $F(2, 258) = 4.6, p < 0.05$; LH : $F(2, 318) = 13.9, p < 0.001$; WR : $F(2, 262) = 7.7, p < 0.005$). An analysis of simple effects reveals a strong word length effect in all patients if matching across word lengths is based on average confusability (DK : $F(2, 221) = 31.1, p < 0.001$] slope = 369 ms/letter, $r^2 = 0.95$; DM : $F(2, 227) = 11.4, p < 0.001$, slope = 462 ms/letter, $r^2 = 0.90$; EL $F(2, 217) = 25.7, p < 0.001$] slope = 846 ms/letter, $r^2 = 0.97$; HJA : $F(3, 215) = 6.0, p < 0.005$] slope = 621 ms/letter, $r^2 = 1.0$; IH : $F(2, 258) = 10.6, p < 0.001$] slope = 620 ms/letter, $r^2 = 1.0$; LH : $F(2, 318) = 20.4, p < 0.001$] slope = 566 ms/letter, $r^2 = 0.97$; WR : $F(2, 262) = 14.0, p < 0.001$] slope = 1035 ms/letter, $r^2 = 1.0$). However, six of the seven patients showed no significant effect of word length if words are paired on their summed confusability (DM : $F(2, 227) < 1$; EL $F(2, 217) < 1$; HJA : $F(2, 215) = 1.6, ns$; IH : $F(2, 258) < 1$; LH : $F(2, 318) < 1.0$; WR : $F(2, 262) < 1.0$). Only DK showed a significant effect of word length in this condition (DK : $F(2, 221) = 3.8, p < 0.05$] slope = 165 ms/letter, $r^2 = 0.99$), which was nevertheless substantially weaker than in the condition with matching on average confusability.

Figure 2. Average RTs across all patients in Exp. 3. The results of each patient were analysed individually. No interaction of word length x matching condition (average vs. summed confusability) was found in any of the patient (DK : $F(2, 216) < 1$; DM : $F(2, 220) < 1$; EL $F(2, 219) < 1$; HJA : $F(2, 219) = 1.7, ns$; IH : $F(2, 258) < 1$; LH : $F(2, 319) < 1$; WR : $F(2, 257)$

< 1]. Averaged across patients and matching conditions, the word length effect is of 826 ms/letter ($r^2 = 1.0$).

Figure 3. Average RTs across all patients in Exp. 4. The results of each patient were analysed individually. None of the patient showed a significant interaction of word length \times matching condition (average vs. summed confusability) (DK : $[F(2, 216) = 1.9, \text{ ns}]$; DM : $[F(2, 218) = 1.5, \text{ ns}]$; EL $[F(2, 216) < 1]$; HJA : $[F(2, 224) < 1]$; IH : $[F(2, 258) < 1]$; LH : $[F(2, 263) = 1.8, \text{ ns}]$; WR : $[F(2, 262) < 1]$). Averaged across patients and matching conditions, the word length effect is of 680 ms/letter ($r^2 = 0.997$).

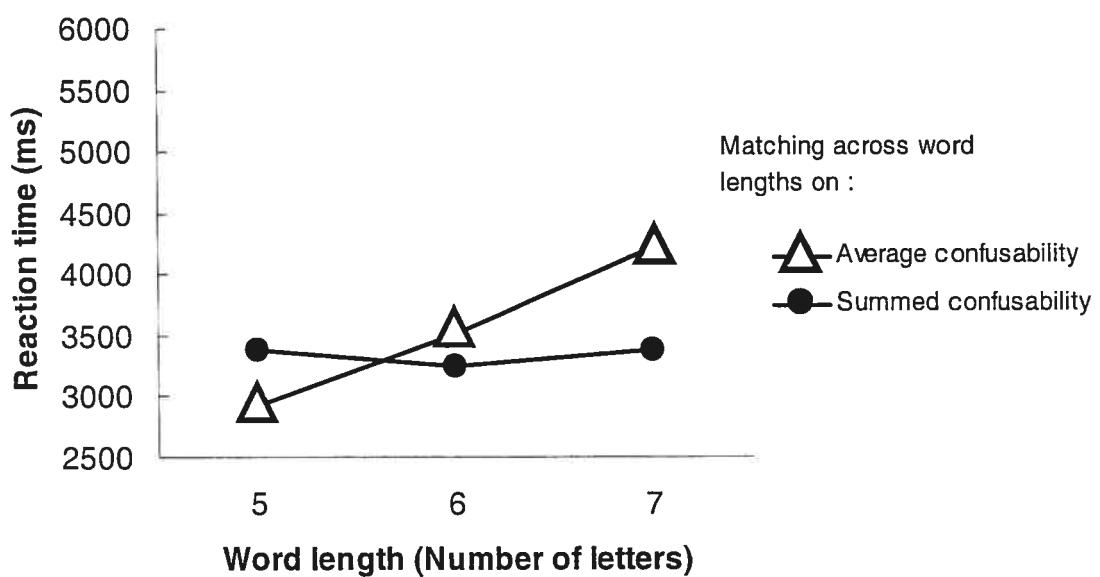
FIGURES

Figure 1 – Fiset, Arguin, Bub, Humphreys & Riddoch

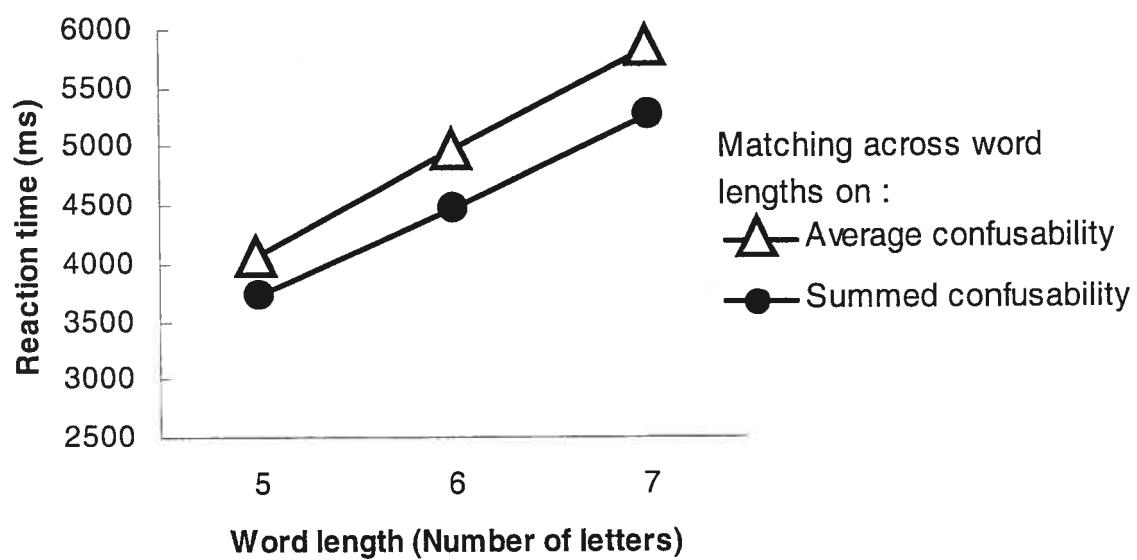


Figure 2 – Fiset, Arguin, Bub, Humphreys & Riddoch

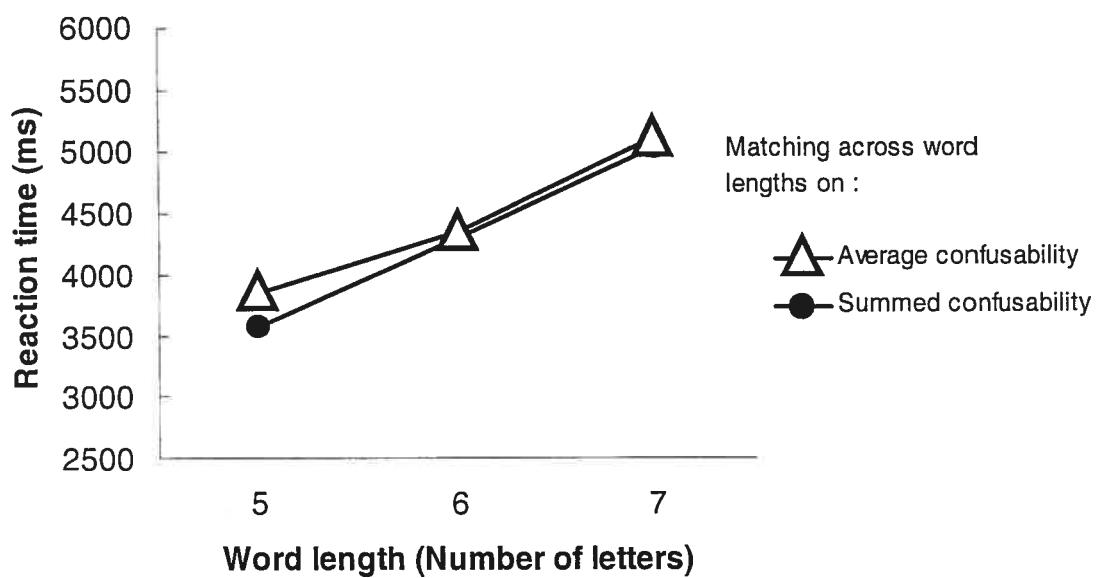


Figure 3 – Fiset, Arguin, Bub, Humphreys & Riddoch

CHAPITRE QUATRIÈME

Discussion générale

L'objectif de la présente thèse de doctorat est de mieux comprendre la cause de la dyslexie lettre-par-lettre. Deux articles forment le corps de la thèse et portent essentiellement sur l'effet de la similarité visuelle des lettres dans cette pathologie de la lecture. Deux questions majeures se posaient à l'origine de ces travaux : 1 - quelle est la cause de l'inefficacité, chez ces patients, du traitement en parallèle des lettres habituellement utilisé par les lecteurs expérimentés et 2 - quel est le rôle fonctionnel de la stratégie séquentielle lettre-par-lettre dans ce trouble neuropsychologique? Les deux articles abordent ces questions sous des angles différents. Le but du premier article est de vérifier le rôle de la similarité visuelle des lettres en ce qui a trait à l'échec du traitement en parallèle des lettres alors que le second article examine le rôle de la similarité visuelle des lettres en ce qui a trait à l'effet de longueur de mot diagnostique de la dyslexie lettre-par-lettre.

Nous allons brièvement revoir les résultats obtenus dans les deux articles, discuter de leurs implications théoriques et proposer un modèle de la dyslexie lettre-par-lettre pour finalement suggérer certaines études complémentaires qui pourraient nous aider à mieux comprendre ce trouble neuropsychologique et vérifier la plausibilité du modèle proposé.

Article 1

Le premier article de cette thèse constitue le prolongement des travaux de Arguin, S. Fiset et Bub (2002). Comme nous l'avons vu dans l'introduction, ces auteurs ont montré que le patient IH éprouvait davantage de difficultés à lire les mots constitués de lettres de haute confusabilité par rapport aux mots constitués de lettres de basse confusabilité. Lors d'une expérience extrêmement importante (expérience 4), les auteurs ont montré que l'effet facilitateur des voisins

orthographiques se restreignait aux mots composés de lettres de basse confusabilité. Selon ces auteurs, l'effet facilitateur du voisinage orthographique est le reflet d'un traitement en parallèle des lettres en lecture. Ils concluent donc que le traitement en parallèle est possible avec les mots constitués de lettres de basse confusabilité mais s'avère extrêmement difficile, voire impossible, avec les mots constitués de lettres de haute confusabilité.

Le premier article présenté consiste en une étude de cas relativement exhaustive du patient LH, lequel a également participé aux expériences du second article. L'effet de longueur de mot de LH est de 526 ms / lettre en dénomination et de 616 ms / lettre en décision lexicale. La présence d'un effet de longueur de mots clairement exagéré par rapport à celui observé chez les sujets contrôles nous permet de poser le diagnostic de dyslexie lettre-par-lettre chez ce patient. Trois séries d'expériences ont été faites. Lors de la première série, nous avons obtenu chez LH les effets de fréquence lexicale et d'imageabilité habituellement observés chez les patients dyslexiques lettre-par-lettre (voir Behrman, Plaut & Nelson, 1998 pour une revue). Lors de cette même série d'expériences, nous avons également investigué la cause de l'effet de voisinage orthographique observé chez plusieurs patients (Arguin, Bowers & Bub, 1998 ; Arguin & Bub, soumis ; Montant & Behrman, 2001) ainsi que chez LH et ce, en comparant les effets du nombre de voisins phonographiques à celui du nombre de voisins orthographiques purs. Les résultats obtenus démontrent un effet facilitateur du voisinage phonographique mais aucun effet du voisinage orthographique pur. Ce résultat est congruent avec ceux obtenus chez des sujets normaux (Peereman & Content, 1997) ainsi que ceux obtenus dans notre laboratoire chez un autre patient dyslexique lettre-par-lettre (IH ; Fiset, Arguin & Saumier, 2001). LH présente donc trois types d'effets de haut-niveau (voisinage phonographique, fréquence lexicale et imageabilité).

Nous interprétons ces effets par le fait que LH est capable d'accéder rapidement aux connaissances de haut-niveau (phonologique, lexicale et sémantique) grâce au traitement en parallèle des lettres. Cette conclusion pourrait toutefois sembler prémature puisque le lien entre les effets de haut-niveau et le traitement en parallèle des lettres d'un mot n'a jamais été investigué directement.

La deuxième série d'expériences vise précisément à valider cette conclusion. Nous avons, dans un premier temps, demandé à LH de nommer des mots dont les lettres étaient présentées de façon incrémentale, de gauche à droite. Le but de cette manipulation était de s'assurer que LH utilise uniquement une stratégie lettre-par-lettre. Chaque lettre était présentée 550 ms avant l'apparition de la lettre suivante. Ce délai a été sélectionné puisqu'il se rapproche de l'effet de longueur de mot observé chez LH en dénomination. Lorsque cette manipulation expérimentale est utilisée, LH ne montre aucun effet du nombre de voisins phonographiques, de la fréquence lexicale ou de l'imageabilité et ce, même si les mots utilisés étaient de basse confusabilité. Par contre, lorsque toutes les lettres sont présentées simultanément, LH montre des effets significatifs aux trois tâches, ce qui réplique les résultats obtenus lors de la première expérience.

La troisième série d'expériences est très proche de l'expérience 4 effectuée par Arquin et collaborateurs (2002). Cette série d'expériences visait à vérifier si la confusabilité des lettres module les trois effets de haut-niveau observés chez LH lors de la première expérience. Les résultats sont concluants : LH montre des effets facilitateurs du voisinage phonographique, de la fréquence lexicale et de l'imageabilité uniquement lorsque les lettres d'un mot sont de basse confusabilité alors que ces effets n'atteignent jamais le seuil de significativité lorsque les lettres

d'un mot sont de haute confusabilité. Par contre, les sujets contrôles ne montrent aucune interaction significative entre les variables de haut-niveau et la confusabilité des lettres. Les interactions observées chez LH ne sont donc pas des artefacts du choix des stimuli mais semblent plutôt provenir du déficit des dyslexiques lors du traitement simultané de plusieurs lettres, particulièrement si ces dernières sont confusables.

Notre interprétation de ces résultats est similaire à celle proposée par Arguin et al. (2002). Lorsque toutes les lettres d'un mot sont présentées simultanément et que ces lettres sont de basse confusabilité, le traitement en parallèle des lettres s'avère possible chez LH. Par contre, le traitement en parallèle des lettres procurerait un input de mauvaise qualité aux systèmes de haut-niveau (phonologie, lexique et sémantique). C'est la qualité de cet input visuel provenant du traitement en parallèle des lettres qui serait modulée par la confusabilité des lettres d'un mot (voir également l'article 2). Lorsque la confusabilité est basse, les connaissances de haut-niveau sont activées et ces dernières aident à la reconnaissance des lettres (par l'utilisation d'attracteurs ou par rétroaction selon le type de modèle postulé). Par contre, lorsque la confusabilité est forte, les connaissances de haut-niveau ne sont pas suffisamment activées pour aider à la reconnaissance du mot. Le rôle du traitement séquentiel permettrait alors d'améliorer la qualité de l'input visuel de sorte que l'identification du stimulus soit possible. Cette hypothèse explique avec simplicité la disparition de l'effet de confusabilité lorsque LH utilise une stratégie séquentielle. Une hypothèse fonctionnelle serait que la focalisation attentionnelle améliorera la qualité du signal visuel en augmentant sa résolution spatiale (Talgar, Pelli, & Carrasco, in press ; Yeshurun & Carrasco, 1998). Cette stratégie permettrait donc à LH d'améliorer la qualité de l'input visuel vers les

systèmes de haut-niveau lui permettant de reconnaître tous les mots écrits si suffisamment de temps lui est accordé.

Article 2

Les résultats du premier article suggèrent que la présence d'un effet de confusabilité des lettres est la cause de l'inefficacité du traitement en parallèle chez les patients dyslexiques lettre-par-lettre. Comme nous le suggérons au début du deuxième article, si cette affirmation est vraie, la confusabilité des lettres devrait également moduler l'amplitude de l'effet de longueur de mot chez les patients dyslexiques. La logique sous-jacente au deuxième article est la suivante :

1 - L'activation rapide des connaissances orthographiques, phonologiques et sémantiques semble nécessaire à l'efficience du traitement en parallèle des lettres chez les sujets normaux (et probablement chez les dyslexiques).

2 - L'activation des connaissances de haut-niveau chez les patients dyslexiques est davantage possible pour les mots possédant une faible confusabilité de lettres et ne se manifeste que si toutes les lettres du mot peuvent être traitées simultanément (voir l'article 1).

3 – Il existe une corrélation extrêmement forte entre le nombre de lettres dans un mot et la confusabilité totale du même mot ($r^2 = 0.86$ en français et en anglais). Les mots courts possèdent une confusabilité moindre et pourraient ainsi bénéficier davantage des processus descendants provenant des connaissances de haut-niveau. Cette différence exacerberait donc les différences de performance entre les mots courts et les mots longs chez les dyslexiques lettre-par-lettre.

Les résultats du deuxième article chez sept patients dyslexiques lettre-par-lettre (DK, DM, EL, HJA, IH, LH et WR) suggèrent que cette logique est exacte. En effet, lors de la première expérience, tous les patients évalués ont un effet de longueur de mot hautement significatif lorsque les mots de différentes longueurs sont appariés sur la confusabilité moyenne. Il est à noter que ce type d'appariement conserve la relation statistique (i.e. la forte corrélation) naturellement présente entre le nombre de lettres dans un mot et sa confusabilité totale (somme de la confusabilité de chaque lettre dans un mot). Par contre, lorsque l'appariement est effectué sur la confusabilité totale, l'effet de longueur de mot diagnostique de cette dyslexie est significativement diminué chez tous les patients évalués. La probabilité d'un traitement en parallèle efficace et utile chez ces patients serait donc modulée par la confusabilité des lettres. En fait, ces résultats suggèrent que l'émergence d'un effet longueur de mot dans cette dyslexie est mieux expliquée par la variable confusabilité de lettre que par le nombre de lettres dans le stimulus.

Toutefois, les résultats obtenus lors de la première expérience peuvent aisément s'expliquer par une difficulté dans le traitement séquentiel des lettres individuelles. En effet, lorsque l'appariement est effectué sur la confusabilité moyenne, les mots de cinq lettres contiennent des lettres dont la confusabilité s'avère similaire à celle des mots de sept lettres. Par contre, lorsque l'appariement est effectué sur la confusabilité totale, les mots de cinq lettres contiennent des lettres dont la confusabilité est supérieure à celles des mots de sept lettres. Un exemple pour mieux illustrer l'idée : si les lettres d'un mot comme OFFRE (confusabilité totale de 2,66 et confusabilité moyenne des lettres de 0,53) sont en moyenne reconnues en 700 ms alors que celles d'un mot

comme ITALIEN (confusabilité totale de 2,68 (similaire à OFFRE) et confusabilité moyenne des lettres de 0,38) sont reconnues en 500 ms, ces deux mots seront reconnus dans les mêmes délais ($5 * 700 \text{ ms} = 7 * 500 \text{ ms}$), ceux-ci possédant pourtant une longueur différente. Nos résultats s'expliquent donc aisément par une théorie où la lecture des patients s'avère strictement séquentielle si, bien sûr, il est exact de penser que ces patients éprouvent davantage de difficultés à reconnaître une lettre de haute confusabilité par rapport à une lettre de basse confusabilité. Les résultats des expériences 2, 3 et 4 infirment cependant cette hypothèse. Dans les deux premières expériences, aucun effet négatif de la confusabilité des lettres n'a été objectivé, que les lettres soient présentées en isolation (Exp. 2) ou dans le contexte d'un mot (Exp. 3). L'ajout du contexte du mot était nécessaire afin de s'assurer de la présence d'un masquage latéral inhérent à la reconnaissance de suite de lettres présentées côté à côté.

Un problème demeure cependant : la reconnaissance des lettres est statique, alors que si les patients utilisent une lecture séquentielle, celle-ci est dynamique. En effet, cette stratégie demande de focaliser successivement son regard (ou son attention) sur chacune des lettres et ce, le plus rapidement possible. Il s'avère donc possible que l'effet de confusabilité soit présent uniquement lorsque le traitement des lettres est effectué de façon rapide et dynamique. L'expérience 4 répond à cette possibilité. Nous avons présenté les stimuli de l'expérience 1 en altérant la forme visuelle des mots. Pour cette manipulation, la position des lettres au niveau de l'axe des y a été modifiée afin d'éloigner chaque lettre de l'axe central successivement vers le haut et vers le bas (voir figure 3). Le but de cette manipulation était d'altérer la forme visuelle du mot afin de diminuer la probabilité que les lettres puissent être traitées en parallèle (voir Ellis, Young & Anderson, 1988, pour une manipulation similaire). Les résultats des sept patients ne

montrent pas l'interaction observée lors de l'expérience 1. Ce dernier résultat suggère que l'effet de confusabilité survient chez les dyslexiques lettre-par-lettre uniquement lorsque plusieurs lettres peuvent être traitées simultanément.

A	B	E
R	R	

Figure 1 : Exemple de stimulus utilisé dans l'expérience de bruit positionnel.

Une dernière hypothèse demeure toutefois plausible et n'a pas été considérée au cours du deuxième article. Il est possible qu'un effet de confusabilité des lettres survienne uniquement lorsque les patients traitent rapidement et successivement plusieurs lettres en présence d'un masquage latéral. Aucune des expériences effectuées dans l'article 2 ne permet d'exclure cette hypothèse. Par contre, l'absence d'effet de confusabilité des lettres pour les mots possédant une basse fréquence, une faible imageabilité ou un faible nombre de voisins orthographiques (voir la série d'expériences #3 de l'article 1) permet d'exclure cette possibilité. Conséquemment, si l'effet de confusabilité provenait de la combinaison de facteurs mentionnés ci-haut, les mots susmentionnés devraient également souffrir d'un effet de confusabilité, ce qui n'est pas le cas. Un autre résultat, obtenu récemment par Fiset, Fiset, Arguin & Blais (2002), plaide également en notre faveur. Pour cette étude, nous avons demandé au patient IH d'effectuer une tâche d'appariement pareil/different sur deux lettres alignées verticalement et présentées à une distance d'environ un centimètre l'une de l'autre. L'alignement vertical permet d'éviter la présence de masquage latéral entre les lettres. Le patient était soumis à deux conditions : les deux lettres étaient soit présentées simultanément (ce qui permet le traitement en parallèle des lettres), soit

l'une après l'autre avec un intervalle inter-stimuli de 500 ms. Les résultats démontrent que l'effet de confusabilité chez IH est exagéré par rapport à celui de sujets normaux uniquement lorsque la présentation permet un traitement en parallèle. L'effet de confusabilité survient donc exclusivement quand les dyslexiques tentent de traiter plusieurs lettres en parallèle.

Dyslexie lettre-par-lettre ou dyslexie de confusabilité ?

En tant que facteur explicatif des performances observées dans la dyslexie lettre-par-lettre, la variable confusabilité de lettres offre un avantage non négligeable par rapport à la variable nombre de lettres. En effet, alors que le nombre de lettres est une variable discrète, la confusabilité totale est une variable continue. Cette dernière offre donc l'avantage d'expliquer à la fois une grande partie (sinon l'ensemble) de l'effet de longueur de mot (Article 2) mais également une partie des variations des TR entre des mots de même longueur (Article 1). Nos résultats montrent que l'effet de longueur de mot disparaît lorsque l'on contrôle pour la confusabilité alors que l'effet de confusabilité est toujours significatif et ce, même quand le nombre de lettres est gardé constant ou contrôlé. Devrions-nous abandonner l'appellation dyslexie lettre-par-lettre pour adopter plutôt une appellation comme la dyslexie de confusabilité (confusability dyslexia ; suggestion de Daniel Bub, communication personnelle)? Nous croyons que nos résultats ne sont pas suffisants pour effectuer une modification de la nomenclature et que certaines démonstrations empiriques plaident encore en faveur de l'existence et de l'importance d'une stratégie lettre-par-lettre chez ces patients. En premier lieu, une étude de mouvements oculaires effectuée par Behrmann, Shomstein, Barton et Black (2001) montre que le nombre de saccades oculaires effectuées par les dyslexiques augmente en fonction du nombre de lettres et que, pour certains mots, toutes les lettres sont fixées (certains mots de 7 lettres sont, par contre, reconnus en une

ou deux fixations). De plus, plusieurs résultats empiriques présentés dans cette thèse démontrent l'importance de la stratégie lettre-par-lettre dans la capacité de lecture de ces patients i.e. lorsqu'ils veulent éviter de confondre les lettres visuellement similaires. La confusabilité des lettres explique donc pourquoi la stratégie parallèle ne fonctionne pas adéquatement alors que la stratégie compensatoire lettre-par-lettre permet une performance de lecture (en terme de pourcentage d'erreurs) excellente malgré la lenteur. Ces deux effets sont donc les deux côtés d'une même pièce de monnaie, alors à quoi bon changer le nom? Un dernier point justifie notre décision. Selon la théorie suggérée dans nos articles, il serait possible d'observer un patient dyslexique lettre-par-lettre sans effet de confusabilité alors que nous ne devrions jamais trouver d'effet de confusabilité sans trouble majeur dans la reconnaissance des mots. En effet, tout individu éprouvant des difficultés à reconnaître les lettres d'un mot (quelle qu'en soit la cause) devrait éprouver de grandes difficultés dans la reconnaissance des mots (voir Pelli, Farell & Moore, 2003 pour un appui de la psychophysique) et montrerait probablement un effet de longueur de mot. Par contre, un patient utilisant une stratégie lettre-par-lettre pure, c'est-à-dire sans aucune tentative de traitement en parallèle, pourrait ne présenter aucun effet de confusabilité en dénomination de mots écrits (ce qui ne veut pas dire que la confusabilité n'est pas la cause de la dyslexie chez ce patient, mais seulement que la stratégie séquentielle qui est résistante à l'effet de ce facteur est utilisée systématiquement). L'effet de longueur de mot demeure donc plus fondamental au diagnostic de dyslexie lettre-par-lettre que l'effet de confusabilité.

Implication des résultats pour notre compréhension de la dyslexie lettre-par-lettre

Les résultats rapportés dans les deux articles de la thèse ont des implications théoriques extrêmement importantes pour le domaine de la dyslexie lettre-par-lettre. En premier lieu, la présence chez ces patients d'un effet de similarité visuelle au niveau de la reconnaissance des lettres suggère que le trouble fonctionnel se situe avant l'accès à la forme visuelle des mots, probablement lors de l'encodage visuel des lettres en parallèle. Nous privilégions donc une hypothèse pré-lexicale comme explication de la dyslexie lettre-par-lettre, où la qualité de l'information visuelle se propageant vers les systèmes de haut-niveau est dégradée par rapport à une lecture normale.

Selon nous, cette diminution de qualité de l'input visuel peut expliquer l'importance des connaissances de haut-niveau dans la lecture des patients dyslexiques lettre-par-lettre ainsi que l'émergence d'une stratégie lettre-par-lettre. Dans l'article 1, LH montre des effets de haut-niveau dont les amplitudes, dans la première série d'expériences et dans la troisième avec les mots de basse confusabilité, sont clairement supérieures à celles observées chez les lecteurs normaux et ce, même si la taille des effets est calculée en terme de pourcentage des temps de réaction moyens (chez LH : 15 % pour le voisinage phonographique, 21 % pour la fréquence lexicale et 11 % pour l'imageabilité alors que chez les lecteurs normaux : 6 % pour le voisinage phonographique, 8 % pour la fréquence lexicale et 0.3 % pour l'imageabilité). LH montre donc des effets de voisinage phonographique et de fréquence lexicale dont l'amplitude relative est de deux à trois fois supérieure à celle des sujets normaux (la comparaison est impossible avec l'effet d'imageabilité puisque nos sujets contrôles n'en montrent aucun). Dans le deuxième article, l'appariement des mots de différentes longueurs sur la confusabilité de lettres totale permet

d'égaliser l'utilité des connaissances de haut-niveau pour les mots de longueurs distinctes, et ainsi de diminuer l'effet de longueur de mot chez tous les patients. Encore une fois, l'activation des connaissances de haut-niveau semble primordiale à une lecture efficiente. En fait, les résultats de LH ainsi que ceux de la majorité des patients dyslexiques (voir Arguin, Bowers & Bub, 1998 ; Montant & Behrmann, 2001) suggèrent que les connaissances de haut-niveau ont un effet positif supérieur chez les patients comparativement aux sujets normaux. Cette observation est en fait conforme à l'intuition et se vérifie fréquemment lors de situations écologiques. Donnons en exemple une situation vécue par plusieurs d'entre nous: imaginons un individu francophone possédant une très bonne connaissance de l'anglais : si l'input auditif est idéal, sa compréhension de l'anglais devrait être excellente (quoique légèrement inférieure à celle du français). Par contre, lors d'une discussion dans une discothèque (où l'input auditif est clairement dégradé étant donné le masquage auditif) la compréhension pourrait devenir faible, voire nulle. Cependant, dans cette même discothèque, la reconnaissance des mots français (ceux-ci pouvant bénéficier davantage des connaissances de haut-niveau) pourrait être excellente, voire parfaite. La différence serait donc faible lorsque l'input est de qualité mais forte lorsque l'input est dégradé (il existe cependant une limite inhérente à notre système perceptif quant à sa capacité à accepter un input de piètre qualité). Les connaissances de haut-niveau sont donc extrêmement utiles en perception lorsque des difficultés surviennent lors du traitement ascendant.

UN MODÈLE DE LA DYSLEXIE LETTRE-PAR-LETTRE

Dans cette section, nous allons proposer un modèle de la dyslexie lettre-par-lettre. Avant de décrire notre modèle, nous allons exposer les résultats de certaines études récentes dans le

domaine de l'imagerie cérébrale fonctionnelle et de la psychophysique qui s'avèrent fort pertinents.

Modèle neuro-anatomique de Cohen et al. (2003)

En premier lieu, nous allons décrire le modèle de la dyslexie lettre-par-lettre proposé par Cohen et al. (2003) sur la base de résultats en imagerie cérébrale fonctionnelle. Ces auteurs ont proposé un modèle mettant l'emphasis sur l'importance du gyrus fusiforme gauche dans le traitement en parallèle de stimuli orthographiques. Le rôle de cette région anatomique serait de créer une représentation abstraite des mots écrits invariante en ce qui a trait à la position dans l'espace (sur l'axe vertical ou horizontal) ainsi qu'au niveau du type de caractères utilisé. À l'aide du recouplement anatomique entre les lésions de plusieurs patients, ces auteurs ont démontré que la dyslexie lettre-par-lettre survenait soit après une lésion du gyrus fusiforme, soit après une lésion des fibres de substance blanche amenant l'information visuelle (des deux hémisphères) vers cette région anatomique. Selon ces auteurs, la perte du gyrus fusiforme gauche ainsi que l'hémianopsie homonyme droite présente chez presque tous les patients les obligent à utiliser d'autres systèmes cérébraux pour la reconnaissance des lettres. Ainsi, un des corollaires du modèle est que la stratégie lettre-par-lettre proviendrait de l'implication du gyrus fusiforme droit (le système de la forme visuelle des mots de l'hémisphère droit) pour la lecture (aire qui ne serait toutefois pas utilisée chez les normaux). Le traitement des mots effectué par cette région anatomique serait exclusivement séquentiel (voir Ellis, Young & Anderson, 1988 ; Coslett & Saffran, 1998 pour une hypothèse similaire en ce qui a trait aux capacités de l'hémisphère droit en lecture), ce qui expliquerait l'émergence d'un effet de longueur de mot significatif.

Selon nous, l'un des problèmes du modèle de Cohen et al. (2003) est qu'il postule d'emblée que l'hémisphère droit, et plus spécifiquement le gyrus fusiforme droit, est incapable du traitement en parallèle des lettres, ce qui l'obligerait à traiter les lettres d'un mot de façon séquentielle. Ce postulat n'a encore reçu aucun appui empirique. En fait, les données obtenues dans le cadre de cette thèse semblent plutôt infirmer l'hypothèse d'un traitement exclusivement séquentiel dans la dyslexie lettre-par-lettre. Par exemple, le patient LH présente des capacités résiduelles de traitement en parallèle malgré son hémianopsie, ce qui contredit le modèle de Cohen et al. De plus, comme ces auteurs le mentionnent, leur modèle est incapable d'expliquer les capacités de lecture implicite (clairement reliées au traitement en parallèle des lettres) observées chez plusieurs patients dyslexiques (Bub & Arguin, 1995 ; Coslett et al., 1993 ; Coslett & Saffran, 1998). Nous allons donc proposer un modèle légèrement différent de celui de Cohen et al. Auparavant toutefois, nous allons présenter certaines données provenant de la psychophysique et qui sont en grande partie à l'origine de nos propositions.

Études psychophysiques de la lecture

Grâce à la méthode de masquage par bande de fréquences spatiales, Solomon et Pelli (1994) ont démontré qu'une bande de fréquences spatiales située à environ trois cycles par lettre était utilisée par les sujets normaux pour la reconnaissance des lettres (voir également Majaj, Pelli, Kurshan & Palomares, 2002). Récemment, Majaj, Liang, Martelli, Berger & Pelli (2003) ont démontré que cette même bande de fréquences spatiales était utilisée pour la reconnaissance des mots écrits. Ces études suggèrent en fait qu'une incapacité à percevoir ou à traiter cette bande de fréquences spatiales pourrait grandement altérer les capacités de lecture d'un individu.

Notre modèle

En grande partie, notre modèle est proche de celui proposé récemment par Cohen et al. (2003).

Par exemple, nous sommes en accord avec l'hypothèse que le gyrus fusiforme gauche possède un rôle essentiel dans le traitement en parallèle des suites de lettres, ce qui est appuyé par les études de neuro-anatomie fonctionnelle citées plus haut. Nous allons cependant offrir une explication différente du rôle des régions subsidiaires (le gyrus fusiforme droit ou toute autre région impliquée) utilisées pour la lecture par les patients dyslexiques lettre-par-lettre. Comme nous venons de le voir, des études effectuées dans le laboratoire de Denis Pelli (Majaj et al., 2002, 2003 ; Solomon & Pelli, 1994) suggèrent que l'information visuelle utile à la reconnaissance des mots se situerait dans une bande de fréquences spatiales située à environ trois cycles par lettre (fréquence moyenne). Cependant, une série d'études rapportées par Ivry et Robertson (1998) suggère que le traitement visuel effectué par les aires temporo-occipitales de l'hémisphère droit serait biaisé pour les basses fréquences spatiales. Les régions anatomiques utilisées dans le traitement des suites de lettres chez les patients dyslexiques ne seraient donc pas idéales pour la tâche, ce qui limiterait grandement l'efficacité de la lecture et ferait émerger des difficultés dans la discrimination visuelle des lettres. L'utilisation de cette information visuelle durant le traitement en parallèle permettrait cependant une activation résiduelle implicite des connaissances de haut-niveau (voir Behrmann, Plaut & Nelson, 1998 ; Plaut, 1999, pour une hypothèse similaire). Moshe Bar (2003) a récemment suggéré une hypothèse similaire dans le domaine de la reconnaissance des formes. Il a en effet suggéré que les effets descendants observés dans ce domaine pouvaient s'expliquer par l'utilisation rapide des basses fréquences spatiales par le système visuel et par certaines aires anatomiques reliées aux traitements de haut-niveau. Ainsi, si la même hypothèse se généralise au domaine de la lecture, les basses fréquences qui sont suboptimales pour la

reconnaissance des lettres (voir Pelli & Solomon, 1994) seraient néanmoins suffisantes pour activer les systèmes orthographique, sémantique et phonologique qui, à leur tour, pourraient aider la reconnaissance des lettres par rétroaction.

Certaines données obtenues dans notre laboratoire semblent confirmer cette hypothèse (Fiset, Arguin & Fiset, en préparation). En effet, la reconnaissance par des sujets normaux de mots présentés en bas contreaste et filtrés passe-bas est grandement influencée par la confusabilité des lettres, mais également par des variables de haut-niveau (fréquence lexicale et nombre de voisins orthographiques). Les données montrent également des taux d'erreurs extrêmement élevés dans ces conditions (entre 15 et 35 %). Ces résultats suggèrent que ce type d'information serait suffisant pour activer les systèmes de haut-niveau mais ferait émerger une difficulté à discriminer les lettres de haute confusabilité. Selon le modèle théorique proposé, l'attention (par le biais de la stratégie lettre-par-lettre) jouerait un rôle d'une importance capitale dans l'identification explicite des mots. Celle-ci permettrait d'améliorer la résolution spatiale autrement limitée de l'hémisphère droit (ou de tout autre structure cérébrale suboptimale pour la lecture), évitant ainsi des confusions entre les lettres visuellement similaires. Suivant cette logique, les lecteurs normaux devraient également utilisés une stratégie compensatoire lettre-par-lettre si l'information pertinente à la lecture normale était éliminée des stimuli et que seules les hautes fréquences spatiales étaient disponibles. Pour vérifier la plausibilité de cette proposition, nous avons demandé à des sujets normaux de lire à voix haute des mots présentés en bas contreaste et filtrés en passe-haut (plus de 6 cycles par lettre). Selon nos prédictions, ces conditions expérimentales devraient obliger les lecteurs normaux à focaliser leur attention sur chaque lettre afin d'améliorer la résolution spatiale de leur système visuel et ainsi extraire les fréquences spatiales disponibles

(voir Yeshurun & Carrasco, 1998). Dans ces conditions, la performance des lecteurs normaux est fortement affectée par le nombre de lettres dans le stimulus (effet de longueur de mot de 620 ms / lettre) mais n'est pas influencée par la confusabilité des lettres. Enfin, le pourcentage d'erreurs demeure bas chez tous les sujets évalués (entre 2 et 5 % seulement).

Ce modèle propose donc l'utilisation de deux types d'information visuelle dans la dyslexie lettre-par-lettre. L'extraction des basses fréquences spatiales par l'hémisphère droit permettrait le traitement en parallèle des lettres (tel que démontré par les effets de haut-niveau et les effets de lecture implicite) mais ferait émerger d'importantes difficultés dans la discrimination des lettres visuellement similaires. Afin d'améliorer la résolution spatiale de l'hémisphère droit et ainsi extraire les fréquences spatiales idéales, les patients dyslexiques utiliseraient une stratégie lettre-par-lettre impliquant l'attention focalisée. L'utilisation de cette stratégie permettrait aux dyslexiques d'éviter les confusions entre les lettres visuellement similaires et de lire correctement tous les stimuli orthographiques si suffisamment de temps leur est accordé. Comme nous l'avons déjà mentionné, ce modèle, qui repose sur des données neuro-anatomiques, psychophysiques et en provenance du domaine des différences hémisphériques, demeure spéculatif. Pour l'instant du moins, les données obtenues chez les sujets normaux permettent de confirmer certaines de ces prédictions.

Perspectives futures

Selon nous, les résultats présentés ici ainsi que le modèle proposé sont d'une importance capitale pour notre compréhension de la dyslexie lettre-par-lettre. Par contre, plusieurs questions importantes demeurent :

1 – D'où provient l'effet de confusabilité des lettres chez les patients dyslexiques ? D'un trouble visuel général, d'un trouble visuel spécifique aux lettres ou d'une difficulté au niveau des représentations ? Des études récentes dans notre laboratoire semblent pencher en faveur d'une explication des effets de confusabilité en termes d'un trouble visuel général qui toucherait davantage les lettres, étant donné leurs propriétés visuelles particulières (Poder, 2003). Ces propriétés visuelles semblent d'ailleurs contraindre le système visuel à l'utilisation préférentielle d'une bande de fréquences spatiales relativement étroite pour la reconnaissance des lettres (Tjan, Chung & Legge, 2002). Comme nous l'avons vu, Pelli et ses collaborateurs ont montré qu'une bande de fréquences spatiales d'environ 3 cycles par lettre était systématiquement utilisée par les sujets normaux lors de la reconnaissance des lettres (Majaj et al., 2002a ; Solomon & Pelli, 1994) et des mots (Majaj et al., 2002b). Ces données psychophysiques suggèrent qu'une incapacité à traiter efficacement ces fréquences spatiales pourrait mener à des troubles de lecture importants. Des travaux sont réalisés actuellement afin de vérifier cette possibilité.

2 – La confusabilité de lettre peut-elle moduler les effets implicites observés chez plusieurs patients dyslexiques lettre-par-lettre (Shallice & Saffran, 1986 ; Coslett et al., 1993 ; Coslett & Saffran, 1998) ? Chez trois patients (DM, EL et IH), des travaux récents montrent que trois types d'effets implicites (amorçage orthographique, amorçage associatif et décision lexicale en présentation tachistoscopique) sont modulés par la confusabilité des lettres des mots (les amorce dans les deux premières expériences et les cibles en décision lexicale ; Fiset, Arguin, Saumier, Humphreys & Riddoch, 2003). Plus spécifiquement, les patients montrent des effets d'amorçage significatifs uniquement lorsque l'amorce est de basse confusabilité. De plus, les patients sont capables de décider si une suite de lettres présentée pendant 200 ms est un mot

connu ou non uniquement lorsque la cible est de basse confusabilité. Ces résultats suggèrent que les effets implicites sont sous l'égide du même input visuel que celui utilisé en reconnaissance explicite de mots (du moins pour la tentative de reconnaître les lettres en parallèle).

3 – Comment se combine l'information provenant du traitement en parallèle et du traitement séquentiel des lettres ?

4 – Quel est le rôle fonctionnel du gyrus fusiforme gauche (région habituellement lésée dans la dyslexie lettre-par-lettre)? Plusieurs possibilités existent : il est, par exemple, possible qu'il agisse à titre de module pour le traitement des lettres (Polk & Farah, 2002), pour le traitement de n'importe quel stimulus visuel ayant des propriétés similaires (Steingrimsson et al., 2003) ou de module pour le traitement de la forme visuelle des mots (Cohen et al., 2000, 2002, 2003 ; Dehaene et al., 2002 ; McCandliss, Cohen & Dehaene, 2003). Un des corollaires du modèle que nous avons proposé est que le gyrus fusiforme gauche pourrait être spécialisé pour la reconnaissance des mots écrits, étant donné son biais pour certaines fréquences spatiales présentant une importance particulière pour la lecture (e.g. 3 cycles par lettre). Des travaux d'imagerie cérébrale fonctionnelle seraient nécessaires afin d'évaluer ces différentes possibilités.

CHAPITRE CINQUIÈME

CONCLUSION

Les données obtenues dans cette thèse de doctorat permettent de mieux comprendre pourquoi les patients dyslexiques semblent incapables d'utiliser le traitement en parallèle des lettres pour lire et pourquoi ils doivent utiliser une stratégie séquentielle lettre-par-lettre. Ces patients éprouvent des difficultés majeures à discriminer les lettres de haute confusabilité (i.e. visuellement similaires aux autres lettres de l'alphabet) et ce, particulièrement lorsqu'un traitement en parallèle des lettres est nécessaire à la tâche (i.e. la lecture). En fait, nos données permettent de conclure que cette difficulté dans l'encodage de plusieurs lettres présentées simultanément est une condition suffisante pour l'émergence d'une stratégie lettre-par-lettre suite à une lésion cérébrale. D'autres études de cas seront toutefois nécessaires dans l'avenir avant de conclure que cette difficulté est la seule pouvant donner lieu à une stratégie séquentielle lettre-par-lettre.

RÉFÉRENCES GÉNÉRALES

- Andrews, S. (1989). Frequency and neighbourhood effects on lexical access: Activation or search? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 15*, 802-814.
- Andrews, S. (1992). Frequency and neighbourhood effects on lexical access: Lexical similarity or orthographic redundancy? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 18*, 234-254.
- Andrews, S. (1997). The effect of orthographic similarity on lexical retrieval: Resolving neighbourhood conflicts. *Psychonomic Bulletin & Review, 4*, 439-461
- Arguin, M., & Bub, D. (1993). Single-character processing in a case of pure alexia. *Neuropsychologia, 5*, 435-458.
- Arguin, M., & Bub, D. (1996). A facilitatory effect of orthographic neighborhood size in letter-by-letter reading. *International Journal of Psychology, 31*, 402.
- Arguin, M., Bub, D., & Bowers, J. S. (1998). Extent and limits of covert lexical activation in letter-by-letter reading. *Cognitive Neuropsychology, 15*, 53-92.
- Arguin, M., & Bub, D.N. (soumis). Parallel processing blocked by letter similarity in letter-by-letter dyslexia : A replication.

Arguin, M., Fiset, S., & Bub, D. (2002). Sequential and parallel letter processing in letter-by-letter dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 19, 535-555.

Bar, M. (2003). A cortical mechanism for triggering top-down facilitation in visual object recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 600-609.

Beauvois, M. F., & Derouesné, J. (1979). Phonological alexia: Three dissociations. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 42, 1115-1124.

Behrmann, M., Plaut, D. C., & Nelson, J. (1998a). A literature review and new data supporting an interactive account of letter-by-letter reading. *Cognitive Neuropsychology*, 15, 7-51.

Behrmann, M., Nelson, J., & Sekuler, E. B. (1998b). Visual complexity in letter-by-letter-reading: "pure" alexia is not pure. *Neuropsychologia*, 36, 1115-1132.

Behrmann, M., & Shallice, T. (1995). Pure alexia: A nonspatial visual disorder affecting letter activation. *Cognitive Neuropsychology*, 12, 409-454.

Behrmann, M., Shomstein, S., Black, S. E., & Barton, J. J. S. (2001). Eye movements of letter-by-letter readers during reading: Effects of word length and lexical variables. *Neuropsychologia*, 39, 983-1002.

Benito-Leon, J., Sanchez-Suarez, C., Diaz-Guzman J. & Martinez-Salio, A. (1997). Pure alexia could not be a disconnection syndrome. *Neurology*, 49, 305-6.

Beversdorf D.Q., Ratcliffe N.R., Rhodes C.H. & Reeves A.G. (1997). Pure alexia: clinical pathologic evidence for a lateralized visual language association cortex. *Clinical Neuropathology*, 16, 328–331.

Binder, J.R. & Mohr, J.P. (1992). The topography of callosal reading pathways. a case-control analysis. *Brain*, 115, 1807–1826

Black, S.E., & Behrmann, M. (1994). Localization in alexia. In A. Kertesz (Ed.), *Localization and neuroimaging in neuropsychology* (pp. 331–376). San Diego, CA: Academic Press.

Bouma, H. (1971). Visual recognition of isolated lower case letters. *Vision Research*, 11, 459-474.

Bowers, J.S., Bub, D. & Arguin, M. (1996). A characterization of the word superiority effect in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*, 13, 415-441.

Bowers, J.S., Arguin, M., & Bub, D. (1996). Fast and specific access to orthographic knowledge in a case of letter-by-letter surface alexia. *Cognitive Neuropsychology*, 13, 525-567.

Bub, D., Black, S., & Howell, J. (1989). Word recognition and orthographic context effects in a letter-by-letter reader. *Brain and Language*, 36, 357-376.

Bub, D.N., & Lewine, J. (1988). Different modes of word recognition in the left and right visual fields. *Brain and Language*, 33, 161-188.

Bub, D., & Arguin, M. (1995). Visual word activation in pure alexia. *Brain and Language*, 49, 77-103.

Bub, D.N., Arguin, M., & Lecours, A.R. (1993). Jules Déjerine and his interpretation of pure alexia. *Brain and Language*, 45, 531-559.

Burgund E.D., Marsolek C.J. (1997). Letter-case-specific priming in the right cerebral hemisphere with a form-specific perceptual identification task. *Brain and Cognition*, 35, 239-258.

Chanoine, V., Ferreira, C.T., Demonet, J.F., Nespor, J.L. & Poncet, M. (1998). Optic aphasia with pure alexia: A mild form of visual associative agnosia? A case study. *Cortex*, 34, 437-448.

Cohen, L. et al. (2000). The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, 123, 291-307.

Cohen, L. et al. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*, 125, 1054-1069.

Cohen, L. et al. (2003). Visual word recognition in the left and right hemispheres: Anatomical and functional correlates of peripheral alexia. *Cerebral Cortex*, 13, 1313-1333.

Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P., & Haller, M. (1993). Models of reading aloud: Dual route and parallel-distributed-processing approaches. *Psychological Review*, 100, 589-608.

Coltheart, M., Davelaar, E., Jonasson, J.T., & Besner, D. (1977). Access to the internal lexicon. In S Dornic (Ed.), *Attention and Performance VI* (pp. 535-555). London: Academic Press.

Coltheart, M., Patterson, K.E., & Marshall, J.C. (1980). *Deep dyslexia*. London: Routledge & Kegan Paul.

Coltheart, M. Rastle, K., Perry, C., Langdon, R. & Ziegler, J. (2001). DRC : A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108, 204-256.

Content, A., & Peereman, R. (1992). *Single and multiple process models of print to speech conversion*. Amsterdam: North Holland.

Coslett, H. B., & Saffran, E. M. (1989). Evidence for preserved reading in 'pure alexia'. *Brain*, 112, 327-359.

Coslett, H.B., & Saffran, E.M. (1994). Mechanisms of implicit reading in alexia. In M.J. Farah & G. Ratcliff (Eds.), *The neuropsychology of high-level vision* (pp. 299–330). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Inc.

Coslett, H. B., Saffran, E. M., Greenbaum, S., & Schwartz, H. (1993). Reading in pure alexia: The effect of strategy. *Brain*, 116, 21-37.

Damasio, A. R., & Damasio, H. (1983). The anatomic basis of pure alexia. *Neurology*, 33, 1573-1583.

Dejerine, J. J. (1892). Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Comptes Rendus et Mémoires de la Société de Biologie*, 61-90.

De Renzi, E., Zambolin, A., Crisi, G. (1987). The pattern of neuropsychological impairment associated with left posterior cerebral artery infarcts. *Brain*, 110, 1099-116.

Dehaene, S., Naccache, L., Cohen, L., Bihan, D.L., Mangin, J.F., Poline, J.B. et al. (2001). Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nature Neuroscience*, 4, 752-758.

Dehaene, S., Le Clec'h, G., Poline, J-B., LeBihan, D., & Cohen, L. (2002). The visual word form area. A prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport*, 13, 321-325.

Derouesné, J., & Beauvois, M. F. (1979). Phonological processing in reading: data from alexia. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 42, 1125-1132.

Ellis, A.W. & Young, A.W. (1996). *Human cognitive neuropsychology. A textbook with readings.* Hove, England : Psychology Press, UK.

Ellis, A.W., Young, A.W. & Anderson, C. (1988). Modes of word recognition in the left and right cerebral hemispheres. *Brain and Language*, 35, 254-273.

Farah, M. J., Stowe, R. M., & Levinson, K. L. (1996). Phonological dyslexia: Loss of a reading-specific component of the cognitive architecture? *Cognitive Neuropsychology*, 13, 849- 868.

Farah, M. J., & Wallace, M. A. (1991). Pure alexia as a visual impairment: A reconsideration. *Cognitive Neuropsychology*, 8, 313-334.

Fiset, D. & Arguin, M. (2002). Modélisation connexionniste de la lecture et des dyslexies acquises. *Revue Québécoise de Psychologie*, 23, 181-205.

Fiset, D., Arguin, M. & Saumier, D. (2001). A Characterisation of the Orthographic Neighbourhood Size Effect in Letter-by-Letter Dyslexia. Poster presentation at 'Canadian Society for Brain, Behaviour and Cognitive Science Meeting', Quebec, Quebec.

Fiset, D., Arguin, M., Saumier, D., Humphreys, G.W. & Riddoch, J. (2003). Orthographic and semantic priming in letter-by-letter dyslexia are blocked by letter similarity. Poster presentation at 'Canadian Society for Brain, Behaviour and Cognitive Science Meeting', Hamilton, Canada.

Fiset, S. & Arguin, M. (1999). Case alternation and orthographic neighborhood size effects in the left and right cerebral hemispheres. *Brain and Cognition*, 40, 116-118.

Freedman, L., & Costa, L. (1982). Pure alexia and right hemiachromatopsia in posterior dementia. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 55, 500–502.

Friedman, R. B., & Alexander, M. P. (1984). Pictures, images, and pure alexia: A case study. *Cognitive Neuropsychology*, 1, 9-23.

Geschwind, N. (1965). Disconnection syndromes in animals and man. *Brain*, 88, 237–294.

Geschwind, N., & Fusillo, M. (1966). Colour-naming defects in association with alexia. *Archives of Neurology*, 15, 137–146.

Hanley, J.R. & Kay, J. (2003) Monsieur C : Dejerine's case of alexia without agraphia. In, C. Code, C.-W. Wallesch, Y. Joanette & A.R. Lecours (Eds.) *Classic Cases in Neuropsychology*, vol. II (pp. 57-74), Hove: Psychology Press.

Harm, M.W. (1998). Division of Labor in a Computational Model of Visual Word Recognition.
Unpublished doctoral dissertation, University of Southern California, Los Angeles, CA.

Harm, M.W. & Seidenberg, M.S. (2001). Are There Orthographic Impairments in Phonological
Dyslexia? *Cognitive Neuropsychology*, 18, 71-92.

Harm, M., & Seidenberg, M.S. (sous presse). Computing the Meanings of Words in Reading:
Cooperative Division of Labor Between Visual and Phonological Processes. *Psychological
Review*.

Henderson, L. (1982). *Orthography and Word Recognition in Reading*. London: Academic Press.

Hinton, G. E., & Shallice, T. (1991). Lesioning an attractor network: Investigations of acquired
dyslexia. *Psychological Review*, 98, 74-95.

Ivry, R.B. & Robertson, L.C. (1998). *The Two Sides of Perception*. University of California, MIT
Press.

Johnson, N.F. (1975). On the function of letters in word identification: Some data and a
preliminary model. *Journal of verbal learning and verbal behaviour*, 14, 17-29.

Jordan, T.R., Patching, G.R., Thomas, S.M. (2003). Assessing the role of hemispheric specialisation, serial-position processing, and retinal eccentricity in lateralised word recognition. *Cognitive Neuropsychology*, 20, 49-71

Kay, J., & Hanley, R. (1991). Simultaneous form perception and serial letter recognition in a case of letter-by-letter reading. *Cognitive Neuropsychology*, 8, 249-273.

Kinsbourne, M., & Warrington, E. K. (1962). A disorder of simultaneous form perception. *Brain*, 85, 461-486.

Landis, T., Regard, M., & Serrat, A. (1980). Iconic reading in a case of alexia without agraphia caused by a brain tumour. A tachistoscopic study. *Brain and Language*, 11, 45-53.

Lavidor, M. & Ellis, A.W. (2002). Word length and orthographic neighborhood size effects in the left and right cerebral hemispheres. *Brain & Language*, 80, 45-62

Lavidor, M., Ellis, A.W. & Pansky, A. (2002). Case alternation and length effects in lateralized word recognition: Studies of English and Hebrew. *Brain and Cognition*, 50, 257-271.

Lavidor, M., Ellis, A.W., Shillcock, R. & Bland, T. (2001). Evaluating a split processing model of visual word recognition: effects of word length. *Cognitive Brain Research*, 12, 265-272.

Levine, D. M., & Calvanio, R A. (1978). A study of the visual defect in verbal alexia-simultanagnosia. *Brain*, 101, 65-81.

Lindell, A. K., Nicholls, M.E.R. & Castles, A.E. (2002). The effect of word length on hemispheric word recognition: Evidence from unilateral and bilateral-redundant presentation. *Brain and Cognition*, 48, 447-452.

Majaj, N.J., Pelli, D.G., Kurshan, P., & Palomares, M. (2002). The role of spatial frequency channels in letter identification. *Vision Research*, 42, 1165-1184.

Majaj, N. J., Liang, A., Martelli, M., Berger, T. D. & Pelli, D. G. (2003) The channel for reading. Vision Sciences Society, Sarasota, Florida, May 2003.

Marshall, J.C., & Newcombe, F. (1973). Patterns of paralexia : A psycholinguistic approach. *Journal of Psycholinguistic Research*, 2, 175-199.

Marsolek, C.J. (1995). Abstract-visual-form representations in the left cerebral hemisphere. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 375-386.

Marsolek, C.J., & Hudson, T.D. (1999). Task and stimulus demands influence letter-case-specific priming in the right cerebral hemisphere. *Laterality*, 4, 127-147.

Marsolek, C.J., Kosslyn, S.M. & Squire, L.R. (1992). Form-specific visual priming in the right cerebral hemisphere. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 18, 492-508

Marsolek, C.J., Schacter, D.L. & Nicholas, C.D. (1996). Form-specific visual priming for new associations in the right cerebral hemisphere. *Memory and Cognition*, 24, 539-556

Massaro, D.W. & Klitzke, D. (1977). Letters are functional in word identification. *Memory and Cognition*, 5, 292-298.

McCandliss B.D., Cohen L., & Dehaene S. (2003). The Visual Word Form Area: Expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Science*, 7, 293-299

McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception Part 1: An account of basic findings. *Psychological Review*, 88, 375-407.

McKeeff, T. J., & Behrmann, M. (sous presse). Relating naming latency and covert processing in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*.

Mewhort, D. J. K., & Beal, A. L. (1977). Mechanisms of word identification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3, 629-640.

- Miozzo, M., & Caramazza, A. (1998). Varieties of pure alexia: The case of failure to access graphemic representations. *Cognitive Neuropsychology, 15*, 203-238.
- Montant, M. & Behrmann, M. (2001). Phonological activation in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology, 18*, 697-727.
- Mycroft, R., Hanley, J.R., & Kay, J. (2002). Preserved access to abstract letter identities despite abolished letter naming in a case of pure alexia. *Journal of Neurolinguistics, 15*, 99-108.
- Mycroft, R.H., Behrmann, M., & Kay, J. (soumis). Evidence for a causal role of a visual processing impairment in letter-by-letter reading?
- Patterson, K., & Kay, J. (1982). Letter-by-letter reading: Psychological descriptions of a neurological syndrome. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 34A*, 411-441.
- Patterson, K. E., Marshall, J. C., & Coltheart, M. (Eds.). (1985). *Surface dyslexia : Neuropsychological and cognitive studies of phonological reading*. London: Erlbaum.
- Peereman, R., & Content, A. (1995). Neighborhood size effect in naming: Lexical activation or sublexical correspondences? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition, 21*, 409-421.

Peereman, R. & Content, A. (1997). Orthographic and phonological neighbourhoods in naming : Not all neighbors are equally influential in orthographic space. *Journal of Memory and Language*, 37, 382-410.

Pelli, D. G., Farell, B., & Moore, D. C. (2003).The remarkable inefficiency of word recognition. *Nature*, 423, 752-756 .

Perri, R., Bartolomeo, P., & Silveri, M.C. (1996). Letter dyslexia in a letter-by-letter reader. *Brain and Language*, 53, 390–407.

Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. (1996). Understanding normal and impaired word reading: Computational principles in quasi-regular domains. *Psychological Review*, 103, 56-115.

Plaut. D.C. & Shallice, T. (1993). Deep dyslexia: A case study of connectionist neuropsychology. *Cognitive Neuropsychology*, 10, 377-500.

Pöder, E. (2003). Spatial-frequency spectra of printed characters and human visual perception, *Vision Research*, 43, 1507-1511.

Polk, T.A., & Farah, M.J. (2002). fMRI evidence for an abstract, not perceptual, word form area. *Journal of Experimental Psychology: General*, 131, 65-72.

Price, C.J., & Humphreys, G.W. (1992). Letter-by-letter reading? Functional deficits and compensatory strategies. *Cognitive Neuropsychology*, 9, 427-457.

Rapcsak, S.Z., Rubens, A.B. & Laguna, J.F. (1990). From letters to words: Procedures for word recognition in letter-by-letter reading. *Brain & Language*, 38, 504-514.

Reicher, G. M. (1969). Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, 81, 275-280.

Roeltgen, D.P., Sevush, S. & Heilman, K.M. (1983). Phonological agraphia: Writing by the lexical-semantic route. *Neurology*, 33, 755-765.

Saffran, E.M. & Coslett, B. (1998). Implicit vs. letter-by-letter reading in pure alexia: A tale of two systems. *Cognitive Neuropsychology*, 15, 141-165.

Schiepers, C. (1980). Response latency and accuracy in visual word recognition. *Perception and Psychophysics*, 27, 71-81.

Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, 96, 523-568.

Sekuler, E., & Behrmann, M. (1996). Perceptual cues in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*, 13, 941-974.

Shallice, T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge: Cambridge University Press.

Shallice, T., & Saffran, E. (1986). Lexical processing in the absence of explicit word identification: Evidence from a letter-by-letter reader. *Cognitive Neuropsychology*, 4, 429-458.

Solomon, J. A., & Pelli, D. G. (1994) The visual filter mediating letter identification. *Nature*, 369, 395-397.

Stachowiak, F.L., & Poeck, K. (1976). Functional disconnection in pure alexia and color naming deficit demonstrated by facilitation methods. *Brain and Language*, 3, 135–143.

Steingrimsson, R., Majaj, N. J., & Pelli, D. G. (2003). Where are letters processed and learned? Neural specialization for letter processing under different learning conditions. *Perception*, 32, supplement.

Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of the Donders method. *Acta Psychologica*, 30, 276–315.

Stone, G. O., & Van Orden, G. C. (1994). Building a resonance framework for word recognition using design and system principles. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 1248.

Strain, E., Patterson, K., & Seidenberg, M. S. (1995). Semantic effects in single-word naming. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 21*, 1140-1154.

Talgar, C. P., Pelli, D. G., & Carrasco, M. (sous presse) Covert attention enhances letter identification without affecting channel tuning. *Journal of Vision*.

Teller, D.Y. (1990). The domain of visual science. In L. Spellman, & J.S. Werner (Eds.). *Visual Perception : The neurophysiological foundations*. (pp. 11-21) San Diego : Academic Press.

Tjan, B. S., Chung, S. T. L., & Legge, G. E. (2002). O letter channels, where art thou?. *Journal of Vision, 2*, 31a

Travers, J.R. (1974). Word recognition with forced serial processing : Effects of segment size and temporal order variation. *Perception & Psychophysics, 16*, 35-42.

Warrington, E.K & Langdon, D. (1994). Spelling dyslexia: A deficit of the visual word-form. [Journal Article] *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry, 57*, 211-216.

Warrington, E.K & Langdon, D.W. (2002). Does the spelling dyslexic read by recognizing orally spelled words?: An investigation of a letter-by-letter reader. *Neurocase, 8*, 210-218.

Warrington, E. K., & Shallice, T. (1980). Word-form dyslexia. *Brain, 103*, 99-112.

