

2M11.3463.10

Université de Montréal

L'utilisation spatio-temporelle de l'information visuelle  
en reconnaissance de mots

Par  
Caroline Blais

Département de psychologie  
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de maîtrise (M. Sc.)  
en psychologie

Août 2006

© Caroline Blais, 2006



BF

22

U54

2407

V-004

**Direction des bibliothèques**

**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

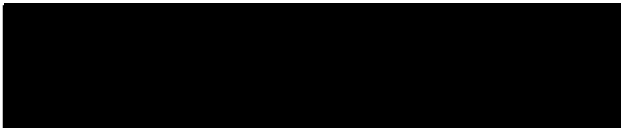
Ce mémoire intitulé :

L'utilisation spatio-temporelle de l'information visuelle  
en reconnaissance de mots

présenté par :


Caroline Blais

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

  
Président-rapporteur

  
Directeur de recherche

  
Codirecteur



## RÉSUMÉ

Les lecteurs adultes sont considérés experts en reconnaissance visuelle de mots (McCandliss, Cohen & Dehaene, 2003). Étant donné la très grande expérience des lecteurs normaux avec les mots, il est probable que le système de lecture mature ait développé des stratégies d'extraction de l'information visuelle afin de reconnaître les mots efficacement. La présente étude utilise la méthode des Bulles (Gosselin & Schyns, 2001; Vinette, Gosselin & Schyns, 2004) afin d'examiner la stratégie d'extraction de l'information visuelle utilisée dans des tâches d'identification de mots et de pseudo-mots. Dix sujets ont identifié chacun 5000 mots et 5000 pseudo-mots échantillonnés aléatoirement dans l'espace et le temps. Les stratégies d'extraction de l'information obtenues avec les deux classes de stimuli vont à l'encontre des hypothèses de traitement parallèle à capacité illimitée et de traitement séquentiel dont l'extraction des lettres s'effectue de la gauche vers la droite. Les résultats suggèrent plutôt soit l'utilisation d'une forme de traitement parallèle à capacité limitée dans lequel la quantité de ressources attentionnelle accordée à chacune des positions de lettre varie à travers le temps, soit l'utilisation du traitement séquentiel dont l'ordre d'extraction ne s'effectue pas de la gauche vers la droite. Une analyse computationnelle permettant de vérifier quelle est la stratégie optimale d'extraction de l'information suggère que les lecteurs expérimentés tirent avantage des propriétés statistiques des mots en allouant plus de ressources aux positions de lettre les plus diagnostiques.

Mots clés : Vision, Reconnaissance de mots, Dynamique spatio-temporelle, Attention, Traitement parallèle, Traitement séquentiel.

## ABSTRACT

Adult readers are considered experts in visual word recognition (McCandliss, Cohen & Dehaene, 2003). Given the experience of normal readers with words, the reading system has most likely developed a strategy of information extraction to recognise words with high efficiency. The present study used the Bubbles method (Gosselin & Schyns, 2001; Vinette, Gosselin & Schyns, 2004) to examine the routine of information extraction used in word and pseudo-word identification tasks. Ten subjects each identified 5,000 words and 5,000 pseudo-words sub-sampled in space-time by bubbles. The strategies of information extraction obtained are incongruent with hypotheses of parallel processing with unlimited capacity and sequential left-to-right processing. Rather, they indicate sequential processing or parallel processing with limited capacity in which the order of extraction is not constrained to a left-to-right direction. A computational analysis verifying what is the optimal attentional deployment suggests that skilled readers take advantage of the statistical properties of word by allocating more resources to the most diagnostic letter positions.

Keywords: Vision, Word recognition, Spatio-temporal dynamics, Attention, Parallel processing, Sequential processing.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b> .....	III
<b>ABSTRACT</b> .....	IV
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	VII
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	VIII
<b>LISTE DES ABBRÉVIATIONS</b> .....	X
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	XI
<b>PREMIER CHAPITRE: INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	1
L'EXPERTISE EN RECONNAISSANCE VISUELLE DE MOTS .....	6
LES STRATÉGIES D'EXTRACTION DE L'INFORMATION VISUELLE.....	9
Modèles proposant l'utilisation du traitement en parallèle avec toutes les classes de stimuli verbaux .....	10
Modèle proposant l'utilisation du traitement séquentiel avec les pseudo-mots.....	16
Modèles proposant l'utilisation du traitement séquentiel avec toutes les classes de stimuli verbaux .....	18
LE PRÉSENT TRAVAIL .....	20
CONTRIBUTIONS À L'ARTICLE .....	24
DÉCLARATION DES COAUTEURS DE L'ARTICLE .....	25
<b>DEUXIÈME CHAPITRE: ARTICLE</b> .....	26
A routine of visual information extraction in word recognition .....	27
<b>ABSTRACT</b> .....	28

INTRODUCTION .....	29
EXPERIMENT 1 .....	33
Method .....	33
<i>Participants</i> .....	33
<i>Stimuli</i> .....	33
<i>Procedure</i> .....	34
Results and discussion .....	36
COMPUTATIONAL ANALYSIS.....	42
GENERAL DISCUSSION .....	52
Conclusion .....	57
REFERENCES .....	58
FOOTNOTES .....	67
TABLES .....	69
FIGURES .....	71
<b>TROISIÈME CHAPITRE: DISCUSSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>79</b>
HYPOTHÈSES DE TRAITEMENT SÉRIEL VS. PARALLÈLE .....	80
ORDRE D'EXTRACTION DES LETTRES .....	83
LES BATTEMENTS ATTENTIONNELS .....	86
CONCLUSION .....	91



**LISTE DES TABLEAUX****PREMIER CHAPITRE**

## Table 1

Symboles nécessaires pour lire le texte ci-dessus et sons qui leurs sont associés .....	2
--	---

**DEUXIÈME CHAPITRE**

## Table 1

Confusability matrix .....	69
----------------------------	----

## LISTE DES FIGURES

## PREMIER CHAPITRE

Figure 1	Modèle de McClelland et Rumelhart (1981) .....	12
Figure 2	Modèle triangulaire de Seidenberg et McClelland (1989) .....	15
Figure 3	Modèle de Coltheart et Rastle (1994) .....	17
Figure 4	Exemples de stimuli générés à l'aide de la méthode des Bulles. L'échantillonnage est ici effectué dans le domaine de l'espace (coordonnées $(x, y)$ ). Notez qu'à chaque essai, un nouveau masque de bulles est généré de manière aléatoire .....	21
Figure 5	Exemple d'une partie d'un stimulus généré à l'aide de la méthode des Bulles. L'échantillonnage est effectué dans les domaines de l'espace et du temps (coordonnées $(x, y, z)$ ). Chacune des lignes représente un moment différent d'un même essai. Ainsi, l'information spatiale échantillonnée varie à travers le temps.....	22

## DEUXIÈME CHAPITRE

Figure 1	Example of the stimuli presented in the experiment. Each grey rectangle represents one of the 24 successive frames of the stimulus. Each frame was presented for 8.33 ms, resulting in a total stimulus duration of 200 ms .....	73
Figure 2	Results of the word identification task. The white blobs represent the pixel locations of the information that was efficiently used. The stimulus in each square was constructed by the superimposition of four letter strings (ddddd, bbbbb, pppp, qqqqq) in order to show the complete spatial extent that could be covered by a stimulus.....	74

Figure 3	Results of the pseudo-word identification task. The white blobs represent the information that was efficiently used. Conventions are the same as in Fig. 2 .....	75
Figure 4	Average best attentional deployment of attention as revealed by the computational analysis (left side) and number of diagnostic pixels per letter, on each frame (right side). The results of the word task are on the top panel and the results for the pseudo-word task are on the bottom panel .....	76
Figure 5	Number of diagnostic pixels per letter, all frames collapsed, in a) the word identification task b) the pseudo-word identification task .....	77
Figure 6	Number of diagnostic pixels per letter, all frames collapsed, in the pseudo-words task for a) the first half b) the second half of the task .....	78

### TROISIÈME CHAPITRE

Figure 6	A) Scores Z moyens sur l'ensemble du mot à travers le temps. B) Énergie dans chaque fréquence temporelle des oscillations.....	87
Figure 7	Scores Z moyens par position de lettre à travers le temps pour les mots (A) et pour les pseudo-mots (C) et énergie dans chaque fréquence temporelle des oscillations (B, D). Les lettres 1 à 5 sont présentées du haut vers le bas .....	90

**LISTE DES ABBRÉVIATIONS**

ms	Milliseconde
Hz	Hertz
Cm	Centimètre

## REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mes deux directeurs de recherche, les professeurs Frédéric Gosselin et Martin Arguin, pour l'excellente formation reçue, leur disponibilité, leurs encouragements continus et leur grande générosité. Merci également pour l'expérience enrichissante que vous m'avez permis de vivre en m'offrant l'opportunité de voyager durant ma maîtrise. Mes remerciements s'étendent au professeur Philippe Schyns, qui m'a accueilli dans son laboratoire à l'Université de Glasgow et a grandement contribué à ma formation. Merci également au professeur Roberto Caldara, pour son aide précieuse et pour m'avoir appris à m'amuser en sciences.

Je remercie tous les membres du laboratoire Gosselin: votre joie de vivre a grandement contribué à mon appréciation de ces deux années de maîtrise. Merci à mes parents et ma famille qui m'ont toujours encouragé et supporté dans tout ce que j'entreprends. Merci également à mes amis de longue date Geneviève Goulet et Olivier Cyr. Un merci tout spécial à mon amoureux, d'une part pour son support et ses encouragements, mais surtout pour m'avoir transmis sa passion pour la science, pour les innombrables discussions intéressantes dans une multitude de domaines et pour son esprit de contradiction.

Ces deux années d'étude ont été subventionnées par une bourse du Conseil de Recherche en Science Naturelle et Génie (CRSNG). Merci également au Ministère de l'Éducation du Québec de m'avoir subventionné pour un stage de recherche à l'étranger.

## **PREMIER CHAPITRE**

### Introduction générale

Commençons par une petite épreuve. Votre tâche sera de lire le court texte ci-dessous le plus rapidement et exactement possible. Vous pouvez vérifier votre performance en mesurant, à l'aide d'un chronomètre, le temps total nécessaire à la lecture du texte. Les symboles qui composent le texte et les sons qui leur sont associés sont présentés au tableau 1.

いえいか こ うかおかいかき あ きかけ

SYMBOLES	SONS	EXEMPLES
あ	[a]	<b>Patte, chatte</b>
い	[s]	<b>Celui, ça, sale</b>
う	[d]	<b>Dans, aide</b>
え	[ə]	<b>Le, premier</b>
お	[f]	<b>Feu, photo</b>
か	[i]	<b>Il, vie, lyre</b>
き	[l]	<b>Lent, sol</b>
け	[R]	<b>Rue, venir</b>
こ	[ε]	<b>Lait, jouet, est</b>
さ	[t]	<b>Terre, vite</b>

Table 1. Symboles nécessaires pour lire le texte ci-dessus et sons qui leurs sont associés.

L'épreuve que vous venez tout juste de subir se compare aux premiers moments de l'apprentissage de la lecture chez les enfants. Si vous avez mesuré votre performance, vous avez probablement remarqué que le temps que vous avez pris pour lire ce texte était considérablement supérieur au temps dont vous auriez eu besoin pour lire un texte contenant le même nombre de mots mais écrit avec l'alphabet roman. Comment, dans ce

cas, en arrivons-nous à lire de manière rapide et efficace et à finalement considérer cette activité comme facile et agréable?

Pour arriver à décoder un texte, les lecteurs débutants doivent d'abord apprendre à discriminer les différents symboles écrits de leur langue afin de les identifier efficacement (Brem, Lang-Dullenkopf, Maurer, Halder, Bucher & Brandeis, 2005; Pelli, Burns, Farrell & Moore-Page, sous presse). La lecture repose donc tout d'abord sur l'extraction, par le système visuel, de l'information nécessaire à la reconnaissance des lettres (McClelland & Rumelhart, 1981; Pelli, Farrell & Moore, 2003). Par exemple, la lecture de l'anglais nécessite la reconnaissance de 52 symboles (26 lettres minuscules et 26 majuscules) et la lecture du français exige, en plus, la reconnaissance de diacritiques comme les accents (é, è, â, ï, etc.) et la cédille (ç). Ces différents symboles peuvent également être produits de différentes manières, i.e. dans différentes polices (e.g. Times, Arial, Century). Pour le système de reconnaissance des lettres, toutes les polices ne sont pas égales et nous avons tendance à utiliser des polices orthographiques connues et relativement peu complexes comme Times New Roman ou Arial afin que la lecture soit la plus agréable possible. Par contre, l'utilisation d'une *POLICE COMPLEXE* (voir Pelli et al., sous presse) ou de **plusieurs polices** distinctes<sup>1</sup> peut rendre la tâche du

---

<sup>1</sup> L'utilisation dans un même mot de plusieurs polices orthographiques distinctes illustre bien la notion d'adaptation à la police ('font tuning') proposée par Sanocki (1987; 1988). En effet, nous sommes plus lents pour reconnaître les lettres d'un mot si celles-ci sont imprimées dans différentes polices plutôt que dans la même police. Cet effet serait lié à la capacité du système cognitif à prendre avantage des régularités inhérentes à une police particulière et celui-ci serait particulièrement visible chez les lecteurs experts (Gauthier, Wong, Hayward & Cheung, 2006)



lecteur plus laborieuse et révèle les limites inhérentes au systèmes d'extraction des lettres en lecture.

La reconnaissance des lettres d'un mot, malgré son importance (Pelli, Farrell & Moore, 2003), ne constitue en rien une finalité. En effet, le lecteur doit ensuite associer les symboles perçus aux sons correspondants, reconnaître la suite de lettres comme un mot de sa langue et lui attribuer un sens<sup>2</sup>. Plusieurs chercheurs ont défini ces différentes « étapes » de la lecture de manière formelle et suggèrent que la lecture implique l'interaction entre le système visuel et trois domaines de connaissances, soit l'orthographe, la phonologie et la sémantique (Hinton & Shallice, 1991; Plaut, McClelland, Seidenberg & Patterson, 1996; Seidenberg & McClelland, 1989). Actuellement, plusieurs appuis empiriques suggèrent que l'activation des connaissances de haut-niveau faciliterait, par voie descendante, l'extraction de l'information visuelle nécessaire à la reconnaissance des mots écrits (Reicher, 1969; Marcel, 1983; Segui & Grainger, 1990) et constituerait une partie importante de ce que les lecteurs gagnent avec la pratique. Ainsi, l'amélioration de la performance de lecture provient d'une augmentation de l'efficacité à différents niveaux de connaissances.

Le présent travail s'intéressera plus particulièrement aux processus d'extraction de l'information visuelle nécessaire à la reconnaissance des mots, de même que l'influence des connaissances orthographiques sur ces processus. En effet, l'augmentation de

---

<sup>2</sup> Un débat existe toujours à savoir si l'accès à la sémantique passe obligatoirement par la phonologie ou si cet accès est possible directement à partir de l'orthographe (Harm & Seidenberg, 2004). Ce débat ne sera toutefois pas présenté ici puisqu'il dépasse les objectifs du présent travail.

l'habileté à identifier les lettres et à utiliser cette information pour reconnaître les mots suggère que les lecteurs expérimentés développent des stratégies d'extraction de l'information visuelle qui les rendent plus efficace que les lecteurs débutants. Plusieurs propositions ont été avancées quant aux stratégies cognitives utilisées par les lecteurs normaux en reconnaissance visuelle de mots (Coltheart & Rastle, 1994; McClelland & Rumelhart, 1981; Plaut et al., 1996; Whitney, 2001). Les méthodes utilisées jusqu'à maintenant pour vérifier ces propositions ne permettaient toutefois pas d'examiner la nature temporelle de la stratégie utilisée par les lecteurs. Le présent travail se penche sur la question de la nature de la stratégie visuelle utilisée par les lecteurs pour reconnaître les mots en utilisant la méthode des bulles (*Bubbles* : Gosselin & Schyns, 2001) dans le domaine spatio-temporel (Vinette, Gosselin & Schyns, 2004). Cette méthode, qui n'a jamais été appliquée dans le domaine de la lecture, permettra de révéler la nature spatiale (i.e. quelles lettres ou combinaisons de lettres sont traitées efficacement) et temporelle (i.e. dans quel ordre ces lettres ou combinaisons de lettres sont traitées) de la stratégie de lecture utilisée.

Trois sections suivront. La première section présentera les différentes études qui suggèrent que l'expérience avec le matériel écrit permet d'améliorer considérablement la performance des lecteurs. Dans la deuxième section, les différentes propositions avancées quant aux stratégies cognitives utilisées en reconnaissance visuelle de mots seront détaillées. Enfin, dans la troisième section, une nouvelle hypothèse de stratégie de lecture sera proposée. L'article constituant le corps de ce travail permettra de développer cette dernière hypothèse.

## L'EXPERTISE EN RECONNAISSANCE VISUELLE DE MOTS

Le lecteur moyen aura lu plus de 100 millions de mots avant l'âge de 25 ans (Geisler & Murray, 2003) et aura reconnu plus de  $1.1 \times 10^9$  lettres à l'âge de 40 ans (Pelli, Burns, Farell & Moore-Page, sous presse). Étant donné l'ampleur de leur expérience et leur efficacité à traiter les mots écrits, les lecteurs adultes sont considérés experts en reconnaissance visuelle de mots (McCandliss, Cohen & Dehaene, 2003). Divers résultats expérimentaux témoignent de cette expertise et du caractère spécial des mots par rapport aux autres formes de stimuli orthographiques (i.e. pseudo-mots, non-mots). En effet, l'observation des temps de lecture et des patrons de mouvements oculaires suggère une plus grande efficacité des lecteurs adultes par rapport aux lecteurs débutants (Aghababian & Nazir, 2000; McConkie et al., 1991; Rayner, 1986; Rayner, 1998); une performance supérieure en reconnaissance de mots que de pseudo-mots ou de non-mots (Weekes, 1997); et une meilleure performance pour reconnaître un mot (plusieurs lettres) qu'une lettre isolée (Reicher, 1969).

La comparaison des temps de réactions et des patrons de mouvements oculaires de lecteurs débutants et de lecteurs expérimentés suggère une augmentation importante de l'habileté à reconnaître les mots avec la pratique. Des études en mouvements oculaires montrent que les lecteurs débutants exécutent en moyenne plusieurs fixations à l'intérieur d'un même mot (McConkie et al., 1991; Rayner, 1986). Le pourcentage de mots recevant plusieurs fixations diminue cependant à mesure que le lecteur prend de l'expérience (McConkie et al., 1991; Rayner, 1986), pour atteindre une moyenne d'une seule fixation par mot chez les lecteurs adultes (Rayner, 1998). Dans le même ordre

d'idée, un effet de longueur de mot (i.e. une augmentation des temps de lecture en fonction du nombre de lettres dans le mot) est observé chez les jeunes lecteurs durant les cinq premières années de leur éducation scolaire (Aghababian & Nazir, 2000). La performance du lecteur adulte devient toutefois invariante au nombre de lettres pour des mots de trois à six lettres (Cohen et al., 2003; Fiset, Arguin & McCabe, 2005; Weekes, 1997). Ces résultats suggèrent soit une augmentation de l'efficacité à extraire l'information visuelle avec la pratique, soit une diminution des contraintes sur le système visuel étant donné une plus grande implication des connaissances de haut-niveau, ou les deux.

Un effet de longueur de mot est toutefois observé chez les lecteurs adultes avec les pseudo-mots (i.e. chaîne de lettres prononçable mais absente du lexique du lecteur) et les non-mots (chaîne de lettres non prononçable; Weekes, 1997) de même qu'avec les mots de plus de six lettres (Cohen et al., 2003, Fiset et al., 2006). Deux interprétations différentes sont généralement proposées pour expliquer l'apparition d'un effet du nombre de lettres avec les pseudo-mots. Une première hypothèse suggère que les connaissances orthographiques, sémantiques et phonologiques facilitent le traitement de l'information visuelle nécessaire à la reconnaissance des mots (Fiset et al., 2006; McClelland & Rumelhart, 1981; Plaut et al., 1996). Selon cette interprétation, étant donné que les chaînes de lettres inconnues ne jouissent pas<sup>3</sup> de l'aide des connaissances de haut niveau, le temps pour extraire l'information augmente en fonction de la

---

<sup>3</sup> Les pseudo-mots peuvent recevoir de l'aide de la phonologie, mais les mécanismes sous-jacents à cette aide sont encore sujets à débat (Plaut et al., 1996) et la phonologie impliquée est certainement moins précise que pour les mots (Harm & Seidenberg, 2001).

difficulté visuelle de la tâche, i.e. en fonction du nombre de lettres. Une deuxième hypothèse tentant d'expliquer l'apparition d'un effet du nombre de lettres avec les pseudo-mots suggère plutôt l'utilisation de stratégies différentes pour reconnaître les mots et les pseudo-mots. Les mécanismes sous-jacents à ces deux interprétations seront revus dans la section suivante. Par ailleurs, l'apparition d'un effet du nombre de lettres avec les mots de plus de six lettres suggère que les capacités du système de lecture sont limitées et que la stratégie d'extraction de l'information visuelle devient moins efficace avec les mots plus longs.

Un autre phénomène, connu sous le nom de « word superiority effect », est un appui classique à l'idée que les lecteurs soient plus efficaces pour extraire l'information visuelle dans les mots que dans les pseudo-mots ou les non-mots. Une étude menée par Reicher (1969) montre que la performance pour reconnaître une lettre est supérieure lorsque celle-ci est présentée à l'intérieur d'un mot que seule ou à l'intérieur d'un non-mot. Dans cette étude, une chaîne de lettres ou une lettre isolée était présentée très brièvement au participant, puis ce dernier devait déterminer l'identité d'une des lettres en choisissant parmi deux possibilités. Dans le cas où la chaîne de lettres présentée formait un mot, les deux possibilités parmi lesquelles le sujet devait choisir formaient également un mot. Par exemple, si le mot présenté était « livre » et que le sujet devait identifier la première lettre, les deux choix pouvaient être « l » ou « v ». La performance supérieure pour les mots par rapport aux non-mots ne peut donc pas être due à la possibilité de deviner avec les mots et suggère plutôt que les connaissances sur l'orthographe, la phonologie et la sémantique facilitent l'extraction visuelle de

l'information. De plus, le fait que la performance soit également supérieure pour les mots par rapport aux lettres isolées élimine la possibilité que la chute de performance avec les pseudo-mots soit due à une plus grande difficulté à se souvenir des lettres.

Ainsi, l'amélioration des temps de lecture chez les lecteurs experts par rapport aux lecteurs débutants de même que la différence de performance avec les mots et les pseudo-mots suggèrent que l'expérience avec le matériel écrit facilite l'extraction de l'information visuelle en reconnaissance de mots. Plusieurs hypothèses quant aux stratégies utilisées par le système de lecture pour extraire l'information visuelle ont été suggérées. Ces hypothèses seront détaillées dans la section suivante.

#### LES STRATÉGIES D'EXTRACTION DE L'INFORMATION VISUELLE

Étant donné l'expérience des lecteurs normaux avec le matériel écrit, il est probable que ces derniers aient développé une ou des stratégies d'extraction de l'information qui leur permette d'extraire l'information visuelle nécessaire à la reconnaissance de mots de manière très efficace. La plupart des chercheurs suggèrent l'utilisation de telles routines en lecture (Coltheart & Rastle, 1994; Coltheart et al., 2001; Harm & Seidenberg, 2001; McClelland & Rumelhart, 1981; Plaut, 1999; Plaut et al., 1996; Seidenberg & McClelland, 1989), mais les hypothèses quant au déploiement spatial et temporel de ces routines sont controversées. Les principales propositions focalisent sur la nature parallèle vs. séquentielle du traitement.

Plusieurs modèles de lecture admettent l'existence d'un traitement en parallèle des lettres. Toutefois, certains suggèrent que le traitement en parallèle est utilisé seulement avec les mots connus (Coltheart & Rastle, 1994; Coltheart et al., 2001) et proposent l'utilisation d'un traitement séquentiel avec les pseudo-mots. D'autres proposent que le système de lecture a recours au traitement en parallèle avec les pseudo-mots également (Harm & Seidenberg, 2001; 2004; McClelland & Rumelhart, 1981; Plaut, 1999; Plaut et al., 1996; Seidenberg & McClelland, 1989). Enfin, certains proposent l'utilisation du traitement séquentiel avec toutes les classes de stimuli verbaux (Whitney, 2001). Les sections suivantes présenteront les différents modèles de lecture proposés de même que les études appuyant ces modèles.

*Modèles proposant l'utilisation du traitement en parallèle avec toutes les classes de stimuli verbaux.*

L'implication de l'attention dans le traitement en parallèle des lettres peut se conceptualiser de deux manières (Lamberts, 2005; Pashler, 1998; Townsend, 1990). Une première hypothèse consiste à proposer que l'attention est portée sur toutes les lettres d'un mot à tous les moments du traitement. Dans ce cas, le début et la fin du traitement se produisent au même moment sur toutes les lettres. Une seconde hypothèse propose plutôt que pour chaque moment, seulement une partie des lettres du mot est traitée. Cette dernière hypothèse admet l'existence d'une forme de traitement en parallèle puisqu'elle suggère que plusieurs lettres sont traitées simultanément. Par contre, elle implique que l'importance accordée à chacune des lettres par les processus attentionnels est modulée à travers le temps.

Plusieurs études appuient l'hypothèse d'un traitement en parallèle des lettres. L'absence d'effet de longueur de mot est probablement l'une des preuves les plus convaincantes à l'appui de cette hypothèse (Weekes, 1997; Cohen et al., 2003). En effet, un traitement séquentiel de toutes les lettres du mot prédit plutôt une augmentation des temps de réaction en fonction du nombre de lettres. Les résultats montrant que les sujets sont aussi rapides (Johnson, 1975) ou plus rapides (Reicher, 1969) dans la reconnaissance d'un mot que d'une lettre sont également considérés comme une preuve de l'utilisation du traitement en parallèle en reconnaissance visuelle de mots. En effet, ces résultats impliquent que le traitement de toutes les lettres d'un mot se fait de manière simultanée et de façon aussi rapide que le traitement d'une seule lettre. De plus, certaines études montrent que la lecture des mots s'effectue de façon plus efficace lorsque toutes les lettres sont présentées simultanément que lorsqu'elles sont présentées de manière sérielle (Travers, 1973; 1974; 1975). Ces résultats suggèrent que la présentation sérielle des lettres modifie la stratégie normale utilisée par le système cognitif, ce qui donne lieu à une baisse de performance.

Plusieurs modèles suggèrent l'utilisation du traitement en parallèle. Le modèle de McClelland et Rumelhart (1981) propose que la reconnaissance des mots implique plusieurs niveaux de traitement, soit les niveaux des caractéristiques visuelles, des lettres, des mots et des connaissances de plus hauts niveaux. Les auteurs proposent que les différents traitements se produisent en cascade et que certains niveaux peuvent interagir. De plus, ils proposent que la perception visuelle est spatialement parallèle, i.e. que l'information présente sur une région assez large pour contenir quatre lettres est



traitée simultanément. La Figure 1 présente les différents niveaux du modèle de McClelland et Rumelhart (1981) de même que les interactions possibles entre ces niveaux.

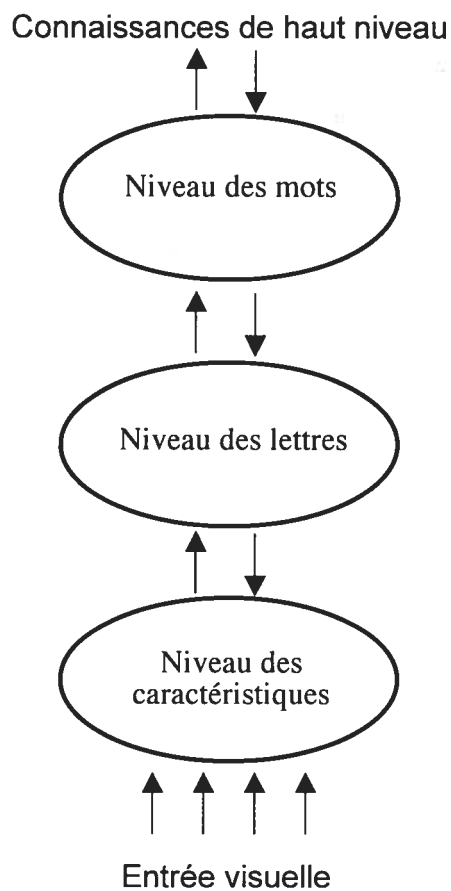


Figure 1. Modèle de McClelland et Rumelhart (1981).

Dans ce modèle, lorsqu'un mot est présenté, les représentations associées aux caractéristiques visuelles de ce mot sont activées, permettant ainsi l'activation des représentations de lettres associées à ces caractéristiques, puis celle des mots associés à ces lettres. L'activation d'un niveau supérieur peut avoir lieu même si le traitement au niveau inférieur n'est pas terminé (i.e. traitement en cascade). De plus, l'activation des

niveaux inférieurs peut être affecté, par rétroaction descendante, par les niveaux supérieurs. Par exemple, l'activation du niveau des lettres peut modifier l'activation du niveau des caractéristiques visuelles et ainsi faciliter l'extraction de l'information visuelle. De même, l'activation du niveau des mots et des connaissances de haut-niveau peut affecter l'activation du niveau des lettres et des mots, respectivement. Ce modèle explique donc la différence de performance entre les mots et les pseudo-mots chez les lecteurs normaux par l'absence de rétroaction descendante provenant du niveau des mots en reconnaissance de pseudo-mots. Le traitement perceptif se fait toutefois en parallèle pour les deux classes de stimuli.

Le modèle triangulaire de Seidenberg et McClelland (1989; voir également Plaut et al., 1996) propose également que le traitement des lettres s'effectue en parallèle pour les mots et les pseudo-mots. Ce modèle implique l'interaction entre trois domaines de connaissances, soit l'orthographe, la phonologie et la sémantique (voir Figure 2). Le modèle postule l'existence de deux voies de traitement : la voie orthographe-phonologie et la voie orthographe-sémantique-phonologie. La voie principale du modèle implique la conversion du code visuo-orthographique en un code phonologique en vue de la prononciation du mot. La population peut être divisée en deux groupes selon la performance de cette voie avec différentes classes de mots. Chez le premier groupe de lecteur, cette voie est suffisante pour identifier à voix haute toutes les suites de lettres prononçables. Pour eux, la voie orthographe-sémantique-phonologie est uniquement nécessaire pour comprendre le sens des mots. Chez un deuxième groupe de lecteurs, la voie orthographe-phonologie donne lieu à des erreurs en lecture de mots irréguliers de

basse fréquence lexicale. Un mot irrégulier est un mot pour lequel la prononciation ne respecte pas les règles de conversions orthographe à phonologie. Par exemple, le mot femme est irrégulier puisqu'il se prononce /fam/ alors qu'il devrait se prononcer /fem/ selon les règles de conversions orthographe à phonologie. Chez ce groupe de lecteurs, la voie orthographe-sémantique-phonologie est nécessaire pour prononcer correctement les mots peu fréquents et irréguliers. Ces deux groupes de lecteurs amènent la prédiction d'un impact différent d'une atteinte de la sémantique sur les performances de lecture. Pour le premier groupe, une atteinte de la sémantique ne devrait affecter la prononciation d'aucune classe de mots, alors que pour le second groupe, on prédit des difficultés à prononcer les mots irréguliers (Plaut & Booth, 2000). Ces deux types de patients ont d'ailleurs été décrits dans la littérature. En effet, certains patients atteints d'une démence sémantique ne montrent pas de difficulté à prononcer correctement les mots irréguliers (Blazely, Coltheart, & Casey, 2005; Schwartz, 1980) alors que d'autres éprouvent systématiquement une dyslexie de surface, i.e. des difficultés à prononcer les mots irréguliers (Hodges, Patterson, Oxbury & Funnell, 1992).

Le modèle triangulaire offre une interprétation intéressante de l'interaction observée entre la lexicalité et la longueur du mot. En effet, les auteurs postulent que les capacités du système perceptif à traiter les lettres en parallèle sont limitées et requièrent l'appui des systèmes de plus haut niveau, tels la sémantique et la phonologie, afin de pallier aux limites inhérentes au système visuel. La baisse de performance des sujets en reconnaissance de pseudo-mots s'explique donc aisément par la faiblesse ou même l'absence de rétroaction en provenance des systèmes phonologique et sémantique vers le

système visuo-orthographique. Le manque d'appui du système sémantique aurait un rôle particulièrement important pour expliquer la diminution de performance avec les pseudo-mots. En effet, les pseudo-mots partagent souvent plusieurs phonèmes avec les mots et peuvent donc jouir d'un léger appui du système phonologique. D'ailleurs, Cummings, Patterson, Verfaellie & Graham (sous presse) ont récemment observé l'émergence d'un effet de longueur de mot important et significatif chez des patients atteints de démence sémantique. Cette observation, tout comme l'effet de longueur observé par Weekes (1997) en identification de pseudo-mots, montre bien l'importance de la sémantique pour l'encodage visuel des mots.

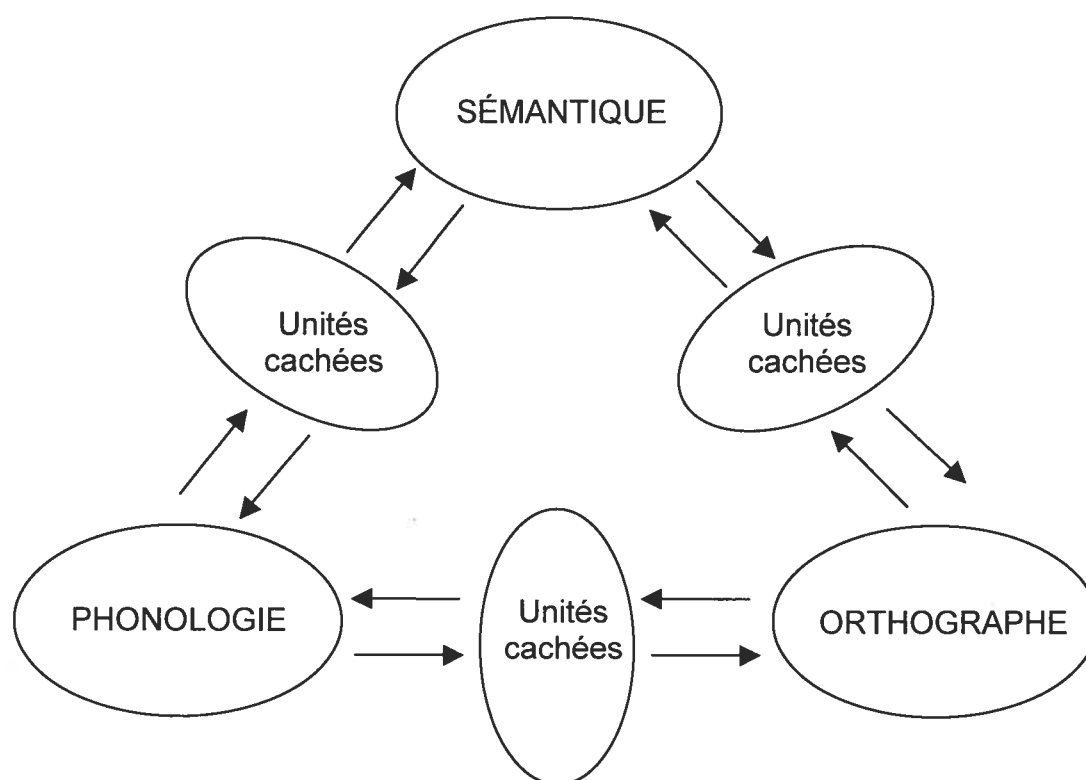


Figure 2. Modèle triangulaire de Seidenberg et McClelland (1989).

*Modèle proposant l'utilisation du traitement séquentiel avec les pseudo-mots*

Les modèles présentés dans la section précédente proposent l'utilisation d'un traitement parallèle avec toutes les classes de stimuli verbaux et expliquent l'apparition d'un effet du nombre de lettres en reconnaissance de pseudo-mots par le manque d'appui des systèmes de plus haut niveau par voie de rétroaction. Une autre hypothèse pouvant expliquer la baisse de performance avec les pseudo-mots consiste à suggérer l'utilisation de stratégies différentes selon la lexicalité du stimulus. Certains auteurs suggèrent l'existence de deux voies de traitement utilisant différentes stratégies d'extraction de l'information et agissant en parallèle (Coltheart & Rastle, 1994; Coltheart et al., 2001). La première voie, dite lexicale, traite les suites de lettres en parallèle et est avantagée lors de la reconnaissance de mots familiers ou irréguliers. La deuxième voie, appelée sous-lexicale, traite les suites de lettres de manière séquentielle, de la gauche vers la droite, et est utilisée lors de la reconnaissance de pseudo-mots ou de mots non familiers (voir Figure 3). Les deux voies agissant en parallèle, la première qui termine le traitement du stimulus donne la réponse.

L'utilisation d'un traitement séquentiel des lettres par la voie sous-lexicale de ce modèle permet d'expliquer l'effet de longueur observé avec les pseudo-mots. Les auteurs de ce modèle ont également montré que pour des mots de basse fréquence (i.e. mots peu familiers), la performance de reconnaissance de sujets normaux est de moins en moins affectée par l'irrégularité du mot à mesure que la position du phonème irrégulier s'éloigne du début du mot. Le modèle permet d'expliquer ce résultat en proposant que les mots irréguliers peuvent être traités par les deux voies (lexicale et sous-lexicale) en

parallèle. Les phonèmes activés inhibent les autres phonèmes, donc l'activation d'un phonème incorrect par la voie sous-lexicale amène l'inhibition du phonème correct activé par la voie lexicale (et vice-versa), donnant ainsi lieu à des réponses conflictuelles (i.e. une bonne réponse provenant de la voie lexicale vs une mauvaise réponse provenant de la voie sous-lexicale). Plus le phonème irrégulier est situé tôt dans le mot, moins le phonème correct a eu de temps pour être activé lorsque le phonème incorrect activé par la voie sous-lexicale commence à inhiber les autres phonèmes. Ainsi, le conflit entre le phonème correct et le phonème incorrect est plus grand lorsque l'irrégularité est située tôt dans le mot. Les résultats obtenus par ces auteurs appuient donc l'hypothèse qu'un traitement sériel est appliqué en lecture, qui serait obligatoire pour certaines classes de stimuli.

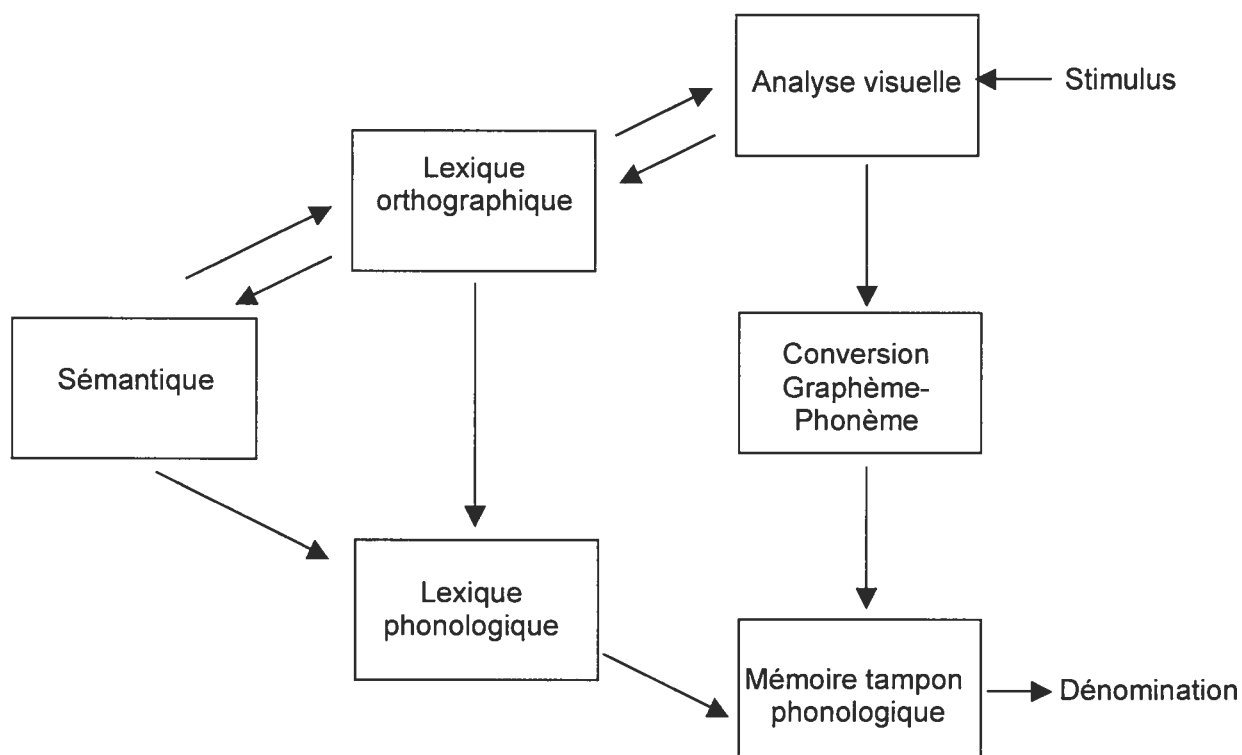


Figure 3. Modèle de Coltheart et Rastle (1994).

*Modèles proposant l'utilisation du traitement séquentiel avec toutes les classes de stimuli verbaux*

Les modèles présentés dans les deux sections précédentes suggèrent tous l'utilisation du traitement en parallèle des lettres en reconnaissance de mot. Whitney (2001) propose au contraire l'utilisation du traitement séquentiel avec toutes les classes de stimuli verbaux. Son modèle possède cinq niveaux: rétine, traits, lettres, digraphes et mots. L'activation des unités de traitement des deux premiers niveaux détermine l'ordre d'extraction des lettres. Au premier niveau, l'activation des unités est déterminée par le « gradient d'acuité ». Ce dernier représente l'acuité rétinienne et diminue donc en fonction de la distance avec le point de fixation. Au niveau suivant, le gradient d'acuité est modifié de sorte que l'activation la plus forte se trouve sur la première lettre et diminue graduellement de la gauche vers la droite. Ce nouveau gradient est appelé « gradient de position ». Afin d'expliquer la transformation du gradient d'acuité en un gradient de position, Whitney postule une plus grande activation des connexions ascendantes vers l'hémisphère droit de même qu'une inhibition latérale, de la gauche vers la droite, des unités au niveau des traits. La différence hémisphérique au niveau de l'activation des connexions ascendantes et la direction de l'inhibition latérale est selon lui acquise durant l'apprentissage de la lecture et dépend donc de la langue : la direction de l'inhibition latérale est inversée pour les langues dont la lecture s'effectue de la droite vers la gauche. Au niveau des lettres, le gradient de position est converti en un ordre temporel d'extraction des lettres. Puisque le niveau d'activation des lettres diminue de la gauche vers la droite, les lettres sont extraites dans cet ordre. L'activation des unités au niveau des digraphes dépend de l'ordre dans lequel les unités de lettres sont activées. Par exemple, le digraphe XY est activé lorsque l'unité X est activée avant l'unité Y. Enfin,

l'activation des unités de mot repose sur des poids de connexions digraphes-mots qui se développent avec l'expérience de même que sur l'ordre d'activation des digraphes.

Kwantes et Mewhort (1999) ont également suggéré l'utilisation du traitement séquentiel avec les mots en se basant sur les résultats d'une étude qui manipulait la position du point d'unicité orthographique (i.e. la position de la lettre qui distingue un mot de tous les autres mots; Kwantes & Mewhort, 1999). Les mots pour lesquels le point d'unicité orthographique est situé sur les premières lettres étaient reconnus plus rapidement que les mots avec un point d'unicité orthographique situé sur les dernières lettres. L'hypothèse d'un traitement en parallèle prédit que peu importe la position du point d'unicité orthographique, le temps pour reconnaître le mot devrait être le même. Les auteurs interprétaient leurs résultats comme un appui à l'hypothèse d'un traitement sériel de la gauche vers la droite. Plus récemment, Lamberts (2005) a montré qu'il est également possible d'interpréter leur résultats comme provenant de l'utilisation d'un traitement séquentiel ou partiellement parallèle dans lequel les lettres peuvent être activées dans n'importe quel ordre.

Les modèles présentés ci-haut proposent différentes théories quant aux stratégies d'extraction de l'information en reconnaissance visuelle de mots et de pseudo-mots, et chacun rend raisonnablement compte de l'ensemble des résultats de la littérature. Toutefois, les études menées jusqu'à maintenant ne permettent pas d'examiner directement le déploiement spatial et temporel de ces stratégies d'extraction. Le présent travail propose une méthode permettant d'examiner la nature spatiale et temporelle de la



routine attentionnelle utilisée pour extraire l'information visuelle en reconnaissance de mots et de pseudo-mots.

## LE PRÉSENT TRAVAIL

Tel qu'expliqué plus haut, les lecteurs adultes ont une très grande expérience avec les mots et les lettres. De plus, la tâche de reconnaître un mot est assez simple si on la compare par exemple à la reconnaissance d'un objet dans une scène visuelle. En effet, le nombre de possibilités quant à un objet cible pouvant apparaître dans une scène est pratiquement infini. De plus, ces objets peuvent apparaître à différentes distances, sous différentes orientations et peuvent être partiellement cachés par d'autres objets de la scène. Au contraire, le nombre de symboles à connaître pour pouvoir lire correctement se limite aux 26 lettres de l'alphabet dans leur deux casses possibles, donc 52 symboles. Comme nous l'avons vu, ces symboles peuvent être présentés dans différentes polices mais ces dernières ont toutes plusieurs caractéristiques communes qui les rendent finalement très similaires entre elles. Il est donc probable que le système cognitif développe, avec l'expérience, une stratégie d'extraction de l'information qui lui permette de reconnaître efficacement les mots écrits. Quelle est cette stratégie et en quoi est-elle plus efficace qu'une autre? Les principaux modèles proposés jusqu'à maintenant postulent soit l'utilisation du traitement en parallèle des lettres, soit l'utilisation du traitement séquentiel, de la gauche vers la droite, des lettres. D'autres hypothèses sont toutefois possibles. Tel que souligné par Lamberts (2005), différentes formes de traitement en parallèle (voir également Pashler, 1998) et de traitement séquentiel sont possibles. Par exemple, il est possible qu'un traitement en parallèle dans lequel une

modulation de l'importance accordée à chacune des lettres dans le temps soit utilisée. Un traitement séquentiel pour lequel l'ordre d'extraction des lettres s'effectue dans un ordre autre que de la gauche vers la droite est également plausible. La présente étude utilise la méthode des bulles afin d'examiner la nature spatiale et temporelle de la stratégie des lecteurs normaux en reconnaissance de mots et de pseudo-mots.

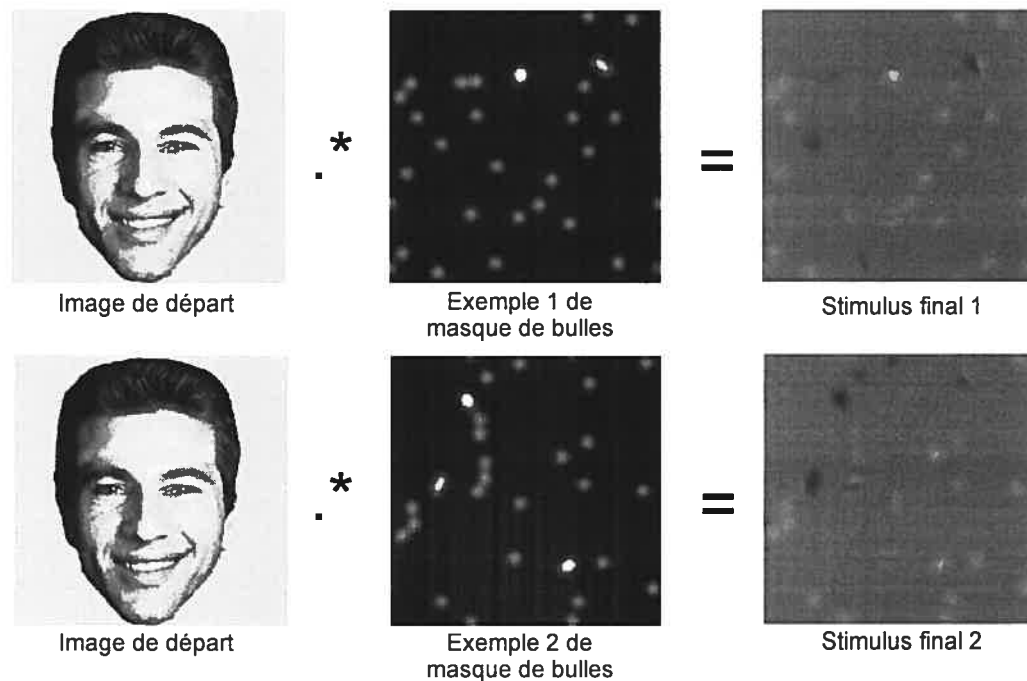


Figure 4. Exemples de stimuli générés à l'aide de la méthode des bulles. L'échantillonnage est ici effectué dans le domaine de l'espace (coordonnées  $(x, y)$ ). Notez qu'à chaque essai, un nouveau masque de bulles est généré de manière aléatoire.

La méthode des bulles permet de révéler l'information qui est utile à la reconnaissance d'un stimulus parmi toute l'information disponible au sein de ce dernier. Son principe général est d'échantillonner aléatoirement l'information présente dans un stimulus. Par exemple, pour échantillonner la dimension spatiale des visages (i.e. les coordonnées  $x$  et  $y$  d'un stimulus), la méthode des bulles révèle, à chaque essai et de manière aléatoire,

différentes parties du stimulus (voir Figure 4 pour différents exemples d'essais). Les ouvertures révélant le stimulus sont appelées bulles. Lorsque l'information révélée par les bulles est importante pour reconnaître un visage, la probabilité que le sujet réponde correctement augmente. Au contraire, lorsque l'information révélée n'est pas importante, la probabilité que le sujet réponde correctement diminue. Un grand nombre d'essais permet d'explorer toute l'information disponible dans le stimulus. Ensuite, une régression multiple sur les réponses des participants et la position des bulles (i.e. les coordonnées  $(x, y)$  de chacune des bulles à un essai donné) permet de déterminer l'information diagnostique pour effectuer la tâche étudiée.

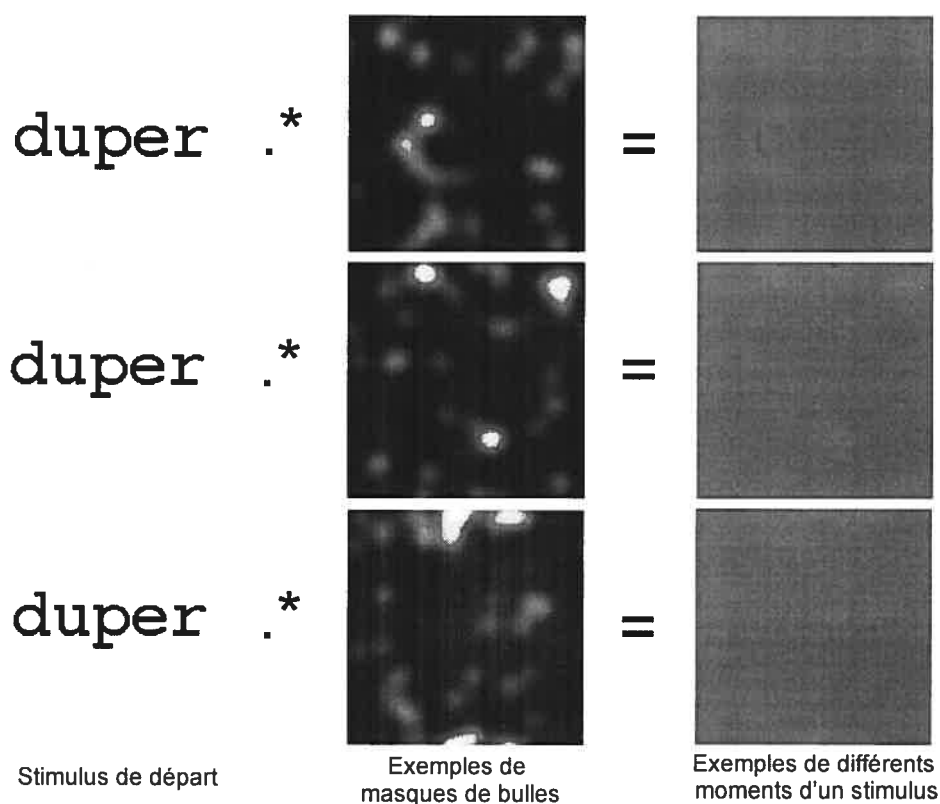


Figure 5. Exemple d'une partie d'un stimulus généré à l'aide de la méthode des Bulles. L'échantillonnage est effectué dans les domaines de l'espace et du temps (coordonnées  $(x, y, z)$ ). Chacune des lignes représente un moment différent d'un même essai. Ainsi, l'information spatiale échantillonnée varie à travers le temps.

La méthode peut être appliquée à différentes dimensions. Par exemple, la présente étude s'intéresse, en plus de la dimension spatiale, à la dimension temporelle. Une étude de Vinette, Gosselin et Schyns (2004) a déjà étudié cette dimension dans une tâche de reconnaissance de visages. Dans ce cas, à l'intérieur d'un même essai, les régions du stimulus qui sont révélées ou cachés varient à travers le temps (voir Figure 5 pour un exemple d'essai). Une régression multiple sur les réponses des participants et les voxels échantillonnés (i.e. les coordonnées  $(x, y, z)$ ,  $z$  représentant la dimension temporelle, de chacune des bulles à un essai donné) révèle la modulation de l'information diagnostique à travers le temps.

L'étude présentée dans la section suivante propose que les lecteurs expérimentés, à travers leurs nombreuses années de pratique avec les mots, parviennent à extraire les propriétés statistiques des mots et à les utiliser afin d'augmenter leur efficacité en lecture. Nous verrons en effet que les résultats obtenus par la méthode des bulles révèlent que les sujets accordent plus de poids à certaines positions de lettres qu'à d'autres. Un modèle idéal permettant de vérifier quelle est la stratégie optimale pour extraire l'information visuelle montre également que les positions de lettres auxquelles les sujets accordent plus d'attention sont en fait celles qui sont les plus diagnostiques (voir dans l'article pour l'explication du modèle).

## CONTRIBUTIONS À L'ARTICLE

La méthode des Bulles a été élaborée par Frédéric Gosselin et Philippe Schyns. L'idée originale et le développement de la version dynamique de cette méthode revient à Frédéric Gosselin. La cueillette et l'analyse des données ont été effectuées par Caroline Blais (incluant la participation à l'écriture et à la modification de programmes MATLAB, dont plusieurs avaient d'abord été élaborés par Frédéric Gosselin), suivant les suggestions de Frédéric Gosselin, Martin Arguin, Daniel Fiset et Pierre Jolicoeur. Le modèle présenté dans l'article a été développé par Frédéric Gosselin. Caroline Blais a écrit les premières versions de l'article et tous les auteurs ont participé à l'écriture des versions subséquentes. Tous les coauteurs consentent à ce que l'article soit inclus dans le présent mémoire, comme l'atteste le formulaire suivant.

## DÉCLARATION DES COAUTEURS DE L'ARTICLE

### 1. Identification de l'étudiant et du programme

Caroline Blais  
M.Sc. Psychologie (2-220-1-3)

### 2. Description de l'article

Auteurs : Caroline Blais, Daniel Fiset, Martin Arguin, Pierre Jolicoeur et Frédéric Gosselin.

Titre : A routine of visual information extraction in word recognition  
Sera soumis à *Cognition*

### 3. Déclaration des coauteurs

À titre de coauteur de l'article identifié ci-dessus, je suis d'accord pour que Caroline Blais inclue cet article dans son mémoire de maîtrise qui a pour titre : *L'utilisation spatio-temporelle de l'information visuelle en reconnaissance de mots*

Daniel Fiset  
Coauteur

Signature

30/08/2006  
Date

Martin Arguin  
Coauteur

Signature

30 août 2006  
Date

Pierre Jolicoeur  
Coauteur

Signature

30 août 2006  
Date

Frédéric Gosselin  
Coauteur

Date

30 août 2006  
Date

## **DEUXIÈME CHAPITRE**

### **ARTICLE**

Blais, C., Fiset, D., Arguin, M., Jolicoeur, P., & Gosselin, F. (en préparation). A routine of visual information extraction in word recognition

## A routine of visual information extraction in word recognition

Caroline Blais<sup>1-2</sup>, Daniel Fiset<sup>3</sup>, Martin Arguin<sup>1-2</sup>, Pierre Jolicoeur<sup>1</sup> & Frédéric  
Gosselin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherche en Neuropsychologie Expérimentale et Cognition, Département  
de Psychologie, Université de Montréal

<sup>2</sup> Centre de Recherche, Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal.

<sup>3</sup> Department of Psychology, University of Glasgow.

Address correspondence to either

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

[REDACTED]

or

Frédéric Gosselin, Ph.D.  
Département de psychologie  
Université de Montréal  
C.P. 6128, Succ. Centre-ville  
Montréal, Qc  
H3C 3J7  
Fax: 514-343-5787  
Phone: 514-343-7550

[REDACTED]



## ABSTRACT

Adult readers are considered experts in visual word recognition (McCandliss, Cohen & Dehaene, 2003). Through the years of practice that gave rise to this expertise, the perceptual system has most likely developed a routine of visual information extraction to recognise words with high efficiency. We asked 10 subjects to read 5,000 words and 5,000 pseudo-words sub-sampled in space-time by *Bubbles* (Vinette, Gosselin & Schyns, 2004; Gosselin & Schyns, 2001) to examine the utilisation of information as a function of spatial location and time. We compare the Bubble results with those of a computational analysis showing the optimal routine of information extraction given perfect lexical knowledge. The results do not support the hypotheses of the utilization of a sequential left-to-right strategy or of parallel processing with unlimited capacity, Rather, they indicate sequential processing or parallel processing with limited capacity in which the order of extraction is not constrained to a left-to-right direction. These observations suggest that experienced readers have learned to take advantage of the statistical properties of words by allocating more resources on the most diagnostic letter positions.

## INTRODUCTION

The average English reader will have read more than 100 million words before he reaches 25 years of age (Geisler & Murray, 2003). Adult readers can therefore be considered as experts in visual word recognition (McCandliss, Cohen, & Dehaene, 2003). This expertise is expressed through various experimental results; for example, in contrast to beginning readers, no significant word length effect (i.e. increasing reading latencies as a function of the number of letters in a word) is found in skilled readers at least for relatively short words (Cohen et al., 2003; Fiset, Arguin, & McCabe, 2006; Weekes, 1997). This finding is often interpreted as evidence for parallel letter processing in visual word recognition (Weekes, 1997; see however Kwantes & Mewhort, 1999; Whitney, 2001). Weekes (1997) has however observed a string length effect with pseudo-words (i.e., letter strings that are pronounceable but absent from the reader's lexicon), suggesting that lexicality modulates the efficiency of the visual processing of letter strings. Given their experience with words, it is conceivable that skilled readers have developed a strategy of visual information extraction to read with optimal efficiency.

The hypotheses regarding the strategies used for information extraction in visual word and pseudo-word recognition generally focus on the parallel vs. sequential nature of the processing. Parallel processing means that all the letters of a word are processed simultaneously. Two kinds of parallel processing are usually discussed (1) exhaustive processing, where the beginning and the end of the processing are synchronized across all the letters or (2) self-terminating processing, where the end of the processing for each

letter may occur at different moments (Lamberts, 2005). Sequential processing (under a strict definition) means that the letters are processed one at a time. The presence of a length effect with pseudo-words is interpreted by many as evidence of serial letter processing. Most authors advocating the application of sequential processing under some conditions argue for a left-to-right strategy (Coltheart, Curtis, Atkins, & Haller, 1993; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001; Coltheart & Rastle, 1994; Kwantes & Mewhort, 1999, Whitney, 2001), although this is certainly not the only possibility. Theoretically, in either parallel or sequential processing, the letters may be processed in many different orders (Lamberts, 2005). For example, in the case of parallel processing in which the end of the processing of each letter may occur at different moments, we can imagine a left to right, an «ends-in» or a random order of information extraction. In a similar way, sequential processing of the letters may occur, for example, from left to right or in a random order. To be optimal, a reading system with limited processing capacity should determine the order in which the letters are processed as a function of the information carried by each letter position.

In the present investigation, we wish to determine what visual information is used by normal readers across time to achieve word recognition. For this purpose, we need to track the evolution of the visual extraction process of skilled readers performing a letter string identification task. The eye tracking method (Rayner, 1978; 1998) has been successfully used in numerous studies in order to assess the extraction of visual and lexical information in reading. However, the temporal resolution of the eye tracking method is not sufficient to reveal the existence of a routine of visual information

extraction in individual word recognition (i.e., the order in which the different spatial regions of a word are processed). In fact, the average ocular fixation duration when reading English (200-250 ms; Rayner, 1998; Sereno & Rayner, 2000; Sereno, Rayner, & Posner, 1998) is about the time needed to recognise isolated words (a word is recognised in less than 250 ms; McCandliss et al., 2003). In a related vein but, more importantly, this method relies on the assumption that what we fixate is what we process. However, it has been known for a long time that we can move our attention without moving our eyes and that we can attend stimulus locations that differ from ocular fixation (Jonides, 1981; Posner, 1980; see however Rayner, 1998; Deubel & Schneider, 2003; Godijn & Theeuwes, 2003). Reading studies using the eye-tracking method show that short words can be apprehended in a single eye fixation (i.e., mean saccade size is 7-9 letters; Rayner, 1998). However, attentional movements could occur within a single fixation, and these cannot be revealed by the analysis of eye movements.

An alternative method to examine a putative routine of visual information extraction in word recognition is the *Bubbles* method (Gosselin & Schyns, 2001; Vinette, Gosselin, & Schyns, 2004). Indeed, this method is capable of revealing the efficient use of visual information through time, with considerable spatial and temporal resolution. Moreover, this method involves no theoretical a priori regarding some form of link between eye movements and attention. The *Bubbles* method has already been successfully used in numerous contexts, that is, in face, scene and emotion recognition studies (Adolphs, Gosselin, Buchanan, Tranel, Schyns & Damasio, 2005 ; Smith, Cottrell, Gosselin, & Schyns, 2005), in combination with ERP (Smith, Gosselin & Schyns, 2006) and with

various types of subjects (e.g., brain damaged patients, pigeons and infants; Caldara, Rossion, Mayer, Smith, Gosselin, & Schyns, 2005; Gibson, Wasserman, Gosselin, & Schyns, 2005; Humphreys, Gosselin, Schyns, & Johnson, in press).

In the first part of the present study, we used Bubbles to examine the spatio-temporal distribution of information use in word and pseudo-word identification. Imagine a word revealed by an animated sequence of masks very similar to successive thin, opaque slices of cheese cut from a brick of Emmenthal cheese. This is in essence what we did in the experiment: on each trial, a target word was randomly sampled by Gaussian bubbles across space and time (see Figure 1). In other words, within one trial, several masks (or slices of cheese, to continue with our analogy) were successively placed over a target letter string, resulting in a modulation of the visual information (here, letter areas) available across time. In order to determine the efficient use of spatio-temporal information, we identified the space-time samples that were associated with correct responses by revisiting all the bricks of Emmenthal cheese.

-----  
Insert Figure 1 near here  
-----

In a second phase of this study, we will compare the behavioural findings obtained with the Bubbles method to the results of a computational analysis that determines what is the optimal strategy of a system with limited capacity and perfect lexical knowledge. To anticipate on the results reported in detail below, we will show that the strategy of information extraction used by skilled readers does not support the hypotheses of

parallel processing with unlimited capacity, parallel processing with limited capacity where the attention is equally distributed on all letter positions, or serial left-to-right processing. Rather, the results suggest either the utilisation of parallel processing with limited capacity, in which the allocation of attention on the different letter positions vary across time, or of sequential processing, in which the extraction of letter is not in a left-to-right direction. We will also show, with our computational analysis, that the order in which the letter positions are processed (or the modulation of the use of the different letter positions across time) is in part influenced by lexical knowledge and letter recognisability.

## EXPERIMENT 1

### Method.

*Participants.* Ten students from the Université de Montréal took part in the experiment. All had normal or corrected acuity.

*Stimuli.* Stimuli were displayed on a calibrated high-resolution Sony monitor with a refresh rate of 120 Hz. The experiment was constructed and ran on a Macintosh G4 computer, using the Psychophysics Toolbox for Matlab (Brainard, 1997; Pelli, 1997). The viewing distance was maintained constant at 36 inches (91 cm) using a chinrest.

Stimuli were lowercase words and pseudo-words printed in Courier 40 points in dark gray over a light gray background (fixed luminance of 0.5). The luminance contrast of

the stimulus was adjusted according to the criteria and procedure described below. Stimuli were constructed from two lists, composed of a thousand five-letter French words and a thousand five-letter pseudo-words, respectively. These five-letter strings subtended a horizontal spatial extent of 95 x 437 mm, 0.6 x 2.75 deg. The list of words was constructed using BRULEX, a lexical database for French (Content, Mousty & Radeau, 1990), and excluded all words with diacritic marks (e.g. é, ê, à, etc.). We also discarded 24 low frequency words that were unknown by most French university students (meaning they would have been considered as pseudo-words by most participants). Pseudo-words were constructed by replacing one or two letters in a real word and they were all pronounceable. As for words, no pseudo-word comprised letters with diacritic marks.

Words and pseudo-words were randomly sampled in space-time with Gaussian bubbles. The resulting stimuli consisted in 24 successive frames of 8.33 ms each. Each bubble had a standard deviation of 0.17 degree of visual angle in the spatial domain (8 pixels) and of 40 ms in the temporal domain. Thus, each bubble lasted an average of 10 frames, but the amount of information revealed by each bubble was maximal during one frame only. This allowed a smooth onset and offset of bubbles.

*Procedure.* Each participant completed a total of 40 experimental blocks of 250 trials over 10 weeks on average. Words and pseudo-words were presented in separate blocks, resulting in 20 blocks of words and 20 blocks of pseudo-words. The blocks of words and pseudo-words were presented alternately, i.e. the subjects performed one block of words, then one block of pseudo-words, and so on. The first experimental

session began with a setting phase: practice blocks of 50 trials each allowed us to find the number of bubbles necessary for each individual to obtain approximately 51% of correct responses. The number of bubbles was adjusted on a trial-by-trial basis by a gradient descent procedure. Each trial of the setting phase began with a tone played at a sample rate of 8192 Hz (the frequency of the tone was 1303.5 Hz and its duration was 122 ms), indicating the beginning of the trial to the participant. The stimulus (a dynamically bubbled word or pseudo-word) was displayed at the center of the screen 250 ms after the end of the tone, and lasted for a duration of 200 ms. It was then replaced by a gray screen until the subject responded. The task of the subject was to name the target as fast and as accurately as possible. Responses were registered by a voice-key connected to the computer controlling the experiment. After each response, the subject registered his response via the computer keyboard and then triggered the next trial by pressing on the «ENTER» key. It took approximately four seconds of computational processing before the next trial began. The setting phase was conducted separately for words and pseudowords, in that order. A second setting phase for words and pseudo-words (performed separately) was conducted halfway into the experimental phase, when participants had completed ten blocks with each target type.

The progress of a trial in the experimental phase was similar to that of the setting phase. The number of bubbles per trial for the first ten blocks of each target type remained constant and was determined by the first setting phase. It was then readjusted during the second setting phase and remained constant for the remaining ten blocks of each target



type. The performance was maintained at 51% correct by adjusting the luminance contrast of the stimulus on a trial-by-trial basis using QUEST (Watson & Pelli, 1983)<sup>1</sup>.

### Results and discussion

In the word identification task, a mean of 332.4 bubbles with an average luminance contrast of 0.1 were necessary to maintain the subjects' performance at 51% correct in the first half of the experiment (between 222 and 530 across subjects), and 252.3 bubbles with an average luminance contrast of 0.1 in the second half of the experiment (between 172 and 455 across subjects). In the pseudo-word identification task, a mean of 384.1 bubbles with an average luminance contrast of 0.098 were necessary to maintain the subjects' performance at 51% correct in the first half of the experiment (between 256 and 530 across subjects), and 304.8 bubbles with an average luminance contrast of 0.1 in the second half of the experiment (between 207 and 530 across subjects). A within-subjects ANOVA involving the factor of stimulus class was conducted to determine whether the number of bubbles necessary to maintain the performance at 51% differed across words and pseudo-words. The number of bubbles was significantly higher for pseudo-words than for words [ $F(1, 9) = 21.765, p < 0.01$ ].

We determined the efficient use of the spatio-temporal information in the stimulus using the following analysis procedure, which amounts to a multiple linear regression on the bubbles masks (explanatory variables) and the subject's response accuracy (predictor variable). We constructed one regression coefficient volume per block for each subject by computing two sums: (1) one made of the sum of the bubbles masks that led to a

correct answer and (2) one made of the sum of the bubbles masks that led to an incorrect answer, and then (3) by subtracting the latter from the former. We will refer to such volumes of regression coefficients as “classification movies”, which is a natural extension of “classification image” an expression used widely to refer to such planes of regression coefficients (e.g., Eckstein & Ahumada, 2002). We then constructed a Total classification movie that included the classification movies of all subjects, weighted by the number of bubbles used. If all regions were equally important, the regression coefficients would be uniform. A divergence from uniformity indicates the relative diagnosticity of each region. In order to establish the statistical significance of a divergence from uniformity, we conducted a one-tailed Pixel test (Chauvin, Worsley, Schyns, Arguin, & Gosselin, 2005) using a 2.5% significance criterion on the Total classification movie.

Figure 2 shows the voxels (space-time information) that were efficiently used (i.e., that were significant, thus diagnostic for participants) in the word recognition task. These results show that letters 2 and 4 (letters are labelled by position, from 1 for leftmost to 5 for rightmost) began to be used most efficiently at the beginning of the stimulus presentation and were rapidly joined, 8 ms later, by letter 3. Letters 3, 4 and 5 were useful 17 ms after stimulus onset. These letters were joined by letter 1 33 ms after the stimulus onset. The usefulness of letter 5 then decreased, but letters 1, 3 and 4 remained useful for a relatively long period of time (letter 1: from 33 to 83 ms; letter 3: from 8 to 108 ms; letter 4: from beginning to 130 ms). Letters 1 and 2 became useful once again from 133 ms to 175 ms after the stimulus onset. The processing finally ended with the

efficient use of the letter 4 between 183 ms after the stimulus onset until the end of stimulus exposure.

-----  
Insert Figure 2 near here  
-----

Figure 3 shows the voxels that were efficiently used in the pseudo-words recognition task. Letter 1 began to be useful 42 ms after stimulus onset, and was followed by letter 4 approximately 40 ms later. Letter 4 remained useful until 125 ms after the stimulus onset, which was immediately followed by letters 1 and 3 and then by letter 2. Letter 3 remained useful until 167 ms, letter 2 until 175 and letter 1 until 183 ms after the stimulus onset.

-----  
Insert Figure 3 near here  
-----

As mentioned in the Introduction, the hypotheses about the strategy of information extraction that have been formulated so far in the field usually focus on the parallel vs. sequential nature of the processing. Most reading models admit the existence of parallel letter processing. However, some suggest that it can be used only with words and they propose the application of sequential processing with pseudo-words and non-words (Coltheart, Curtis, Atkins & Haller, 1993; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001; Coltheart & Rastle, 1994). Some authors also propose that the reading system uses a sequential strategy of information extraction with all classes of verbal stimuli (Kwantes & Mehwort, 1999; Whitney, 2001). Most of the authors who propose the

utilisation of sequential processing suggest, irrespective of stimulus type, that the extraction of the letters occurs in a left-to-right order (Coltheart, Curtis, Atkins & Haller, 1993; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001; Coltheart & Rastle, 1994; Kwantes & Mewhort, 1999; Whitney, 2001; see however Lamberts, 2005).

The behavioural data reported in the present study is clearly incongruent with a left-to-right sequential extraction of information. Indeed, in the word recognition task, the extraction of information begins in the middle and right parts of the word. Moreover, the attention does not necessarily move to adjacent letter positions, thus occasionally skipping intermediate locations (e.g. from letter 4 to 2 or 3 to 1) and these movements may be in a leftward or a rightward direction. Despite the fact that the results of the word recognition task do not support the sequential hypothesis, we could have expected the results with pseudo-words to be more favorable to this view since some reading models propose the utilisation of sequential processing with pseudo-words only (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001; Coltheart & Rastle, 1994). However, this was not the case. In the pseudo-word identification task, the second letter to become useful (after letter 1) was not letter 2, as would be expected with a left-to-right extraction of information, but letter 4. Moreover, similarly to the results obtained in the word task, attention does not always move to adjacent letters and these moves may be in either direction. Note, however, that the simultaneous use of more than one letter position at some point in time is less important with pseudo-words than with words (see Figs. 2 and 3).

Parallel processing may be conceptualised in two different ways (Pashler, 1998). A first possibility is to propose that attention is distributed on all the letters of a word throughout the duration of processing. This hypothesis implies that the beginning and end of processing occur at the same time for all letters and this may occur with either unlimited or limited processing capacity. Distributing attention to all letter positions simultaneously will have no impact on the performance of a system with unlimited capacity but will induce a cost of the number of letters in the performance of a system with limited capacity. A second possibility is that only a subset of the letters composing the word is processed simultaneously. This second hypothesis, which may occur only with limited capacity parallel processing, predicts a modulation across time of the attentional resources allocated to each letter position. Our behavioural results do not support the former hypothesis since there is no case (either for words or pseudo-words) where we find that all the letters of the stimulus are processed simultaneously. One could argue that the Bubbles method, because it hides some part of the stimulus, can lead to the utilisation of a more serial strategy. However, the optimal strategy to succeed in a Bubbles task for a system with unlimited capacity would of course be to distribute attention across all letter positions at once. In that way, whenever a letter position is revealed, the system is ready to process it. Since the main constraint in our tasks was response accuracy, it is very unlikely that the subjects switched from an optimal strategy to one that would greatly decrease their probability of success.

Two possible hypotheses remain. The present behavioural results could be explained either by a sequential process or by a parallel strategy with limited processing capacity

whereby the order of extraction is not from left-to-right. Unfortunately, the results do not allow to tease apart these two possibilities. Indeed, even though two or more letters may appear to be processed simultaneously in the attentional routines reported here, it should be kept in mind that these routines were obtained by summing the information used across all trials. It is therefore possible that two letters that are revealed simultaneously in the results were actually used independently on different trials. A second-order analysis would be necessary to verify if combinations of two or more letters were indeed processed at the same time, but this kind of analysis is very costly in terms of the number of trials it requires and we do not have sufficient power to perform it from the current observations.

Given that English is read from left to right, why is the order of extraction of letters not in a left-to-right direction? One possibility is that some letter positions contain more information than others about the identity of the target word. Accordingly, it has been shown that the initial letters of words often carry more information than the end letters (Shillcock, Ellison, & Monaghan, 2000). In that case, for a system with limited capacity that processes words either by extracting letters one letter at a time or by extracting a small subset of letters simultaneously, it would be optimal to allocate more resources to the most diagnostic letter positions. In the next section, we present a computational analysis that determines what is the optimal strategy of letter extraction for a system with limited capacity and perfect lexical knowledge.

## COMPUTATIONAL ANALYSIS

The hypothesis that will be assessed in the present section is that some letter positions are more diagnostic than others and that the reading system allocates more resources to these positions, as suggested by the behavioural findings reported above. Indeed, for a system with unlimited capacity, the optimal strategy is to distribute attention to all letter positions simultaneously. It is only for a limited capacity system that it would become optimal to allocate more resources to the most diagnostic letters. There are numerous findings suggesting that human information processing capacity is limited. For example, the well known study of Miller (1956) has shown that human short-term memory capacity is of seven plus or minus two chunks of information; studies of subitizing have shown that human subjects can rapidly and accurately report the numerosity of sets containing up to 3 or 4 elements (Dehaene & Cohen, 1994); and «change blindness» experiments have shown that subjects asked to notice changes in natural scenes have a very poor performance, even if the change occurs on central objects of the scene (Levin & Simons, 1997; Simons & Rensink, 2005). In the reading domain, a possible interpretation of the length effect observed with pseudo-words as well as with words containing more than 6 letters (Cohen et al., 2003; Fiset, Arguin & McCabe, 2006) is that processing capacity is limited with stimuli composed of several letters.

The idea that the relative diagnosticity of the different letter positions has an impact on the performance is not completely new. In fact, some studies suggest that the optimal viewing position (i.e., the fixation position for which performance is maximal when a word is briefly presented; O'Regan, Levy-Shoen, Pynte, & Brugailière, 1984; O'Regan

& Levy-Shoen, 1987) is determined by lexical constraints (Clark & O'Regan, 1999; Farid & Grainger, 1996; Stevens & Grainger, 2003). According to these studies, subjects fixate at the position that will increase the visibility of the most diagnostic letters. If lexical constraints influence the optimal viewing position, then it appears likely it should also affect the strategy of visual information extraction.

In order to determine what order of visual extraction is optimal, that is, leads to fast and accurate word recognition, we conducted a computational analysis. Our computational analysis is similar in many ways to the Legge et al. (1997, 2002) Mr. Chips model. Mr. Chips is an ideal observer which uses all the visual, lexical and oculomotor information available to select the saccade length that will minimize the uncertainty (i.e. the entropy, as defined by information theory) about a word in a text. Our computational analysis uses all the lexical information available in order to select the letter position that will minimize the uncertainty about the identity of the word displayed. Thus, the philosophy is the same and the algorithms share a lot. The most important difference between the two models is their domain of applicability: the model outlined in this article is an ideal model of attention deployment during visual word recognition – between saccades – whereas Mr. Chips is an ideal model of saccades during sentence reading. Mr. Chips includes – but only implicitly – the other model. In this sense, these models are complementary.

Our computational analysis assumed that the letters are the atoms of information for word reading (Pelli, Farell, & Moore, 2003). This, of course, is an oversimplification



because letters are also decomposable into features (Pelli, Burns, Farrell, & Moore-Page, in press). We assumed that time ticks in a discrete manner (VanRullen & Koch, 2003). We also assumed two processing stages: the first one corresponds to bottom-up, encapsulated, low-level visual processes (e.g., Pylyshyn, 1999) and the second one to a bidirectional (i.e., bottom-up and top-down), attentional mechanism. That is, the deployment of this second processing stage is informed by lexical knowledge. Finally, we assumed that this attentional mechanism has limited processing capacity.

Given the limited capacity of the reading system, the optimal strategy – or rather the optimal family of strategies – consists in scanning the maximum number of letters within one clock cycle as well as scanning different groups of letters across clock cycles. One consequence of this is that all words of less than  $M$  letters,  $M$  being the maximum number of letters that can be attended in a processing cycle, can be read at a glance and that all words of  $N$  letters, with  $N > M$ , are read in a number of processing cycles increasing linearly as a function of length with a slope of  $N/M$ . For the simulation reported in this article, we considered both an observer that can attend to any  $m$  positions at once and one that can attend only to adjacent positions (i.e., an attentional spotlight). In the first case, the number of attentional deployments to consider is equal to

$$C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!m!} \text{ and in the second, to } m - n + 1.$$

In order to find what is the best strategy of information extraction given specific attentional capacity and a lexicon of a thousand five-letter words, we computed the average of 5,000 optimal attentional deployments as a function of clock cycles. The best

attentional routine  $R_c$  at clock cycle ( $c$ ) was equal to the attentional deployment ( $K$ ) that minimized the uncertainty regarding the target word:

$$R_c = K \Rightarrow \min \left( - \sum_i P_K(\text{word}_i \text{ on cycle}_{c+1}) \log_2(P_K(\text{word}_i \text{ on cycle}_{c+1})) \right)$$

where  $P_k$  is the probability of each word of the lexicon to be the target given a particular attentional deployment  $K$ . The computation of one best attentional deployment involved the following steps. First, a target word was randomly selected from the lexicon. At the beginning of the first cycle, each word and each letter had an equal probability to be the target. We fixed this probability to 1/1000 for words and letters. On each cycle, the probability of recognition of the letter or combination of letters on which attention was deployed was computed using a confusability matrix derived in our laboratory<sup>2</sup> (see Table 1). A letter confusability matrix gives the probability of reading letter  $x$  given that letter  $y$  is presented ( $P(x|y)$ ), with  $x$  and  $y$  spanning all letters of the alphabet. For example, if the word was “javel” and the attention was directed on the first letter, the probability of identifying this letter as a “j” was 0.31, the probability of identifying it as an “f” (as in the word “fille” for instance) was 0.07 (since the probability to confuse a “j” for an “f” is of 0.07), and so on. The probability that a word was the target was equal to the cumulated probability that each letter of this word was the target letter. Thus, to pursue with our example, the probability that the word presented was the target was of  $0.31 * 1/1000 * 1/1000 * 1/1000 * 1/1000$  for the word “javel” (i.e., the cumulated probability of recognition of each letter), of  $0.07 * 1/1000 * 1/1000 * 1/1000 * 1/1000$  for the word “fille”, and so on. The probability that each word of the lexicon was the target word was therefore represented by a vector of one thousand elements.

The vector of word probabilities was used to compute the informativeness of a letter or combination of letter positions with the equation above. Within one clock cycle, the informativeness was calculated independently for each possible letter position or combination of letter positions (depending on the  $M$  chosen). The letter position or combination of letter positions that minimized the uncertainty regarding the target word was then chosen as the best location on which to allocate attention on at that cycle. The probability of recognizing each word and each letter was then updated by assuming that, on this particular cycle, attention was directed on the position chosen as the most informative one. When one of the word reached a probability of being the target of .99, the run was terminated

Let us illustrate how both factors, that is letter confusability and lexical knowledge, modulate the informativeness of each letter position. The first factor assumes that each letter has a certain probability of being recognized as well as a vector of probabilities of being confused with other letters. These probabilities are provided by the letter confusion matrix shown in Table 1. Low confusability letters (i.e., those with a high probability of being recognized) will be more informative than high confusability letters. For example, assume that the human observer can process two letters simultaneously, and consider two different combinations of letter positions in the five-letter word "javel", that is positions 2-3 and 4-5. According to the confusability matrix, the probability of correctly recognizing both letters 2-3 on a single processing cycle is  $0.33 * 0.49 = 0.16$  and of  $0.35 * 0.15 = 0.05$  for letters 4-5. Therefore, if we were to consider

only this first factor, the letters 2 and 3 would be counted as the most informative to recognise the word "javel".

Letter confusability should also affect the time course and nature of word identification. Indeed, the system should attend to the most informative positions, and the informativeness changes as a function of the updating of the probability that each letter position is correctly identified. For example, suppose again that the word to be read is "javel". After a single glance, either the attended letter is correctly identified (e.g., an 'a' is identified as an 'a') or it is misidentified (e.g., an 'a' is confused for an 'o'). The probabilities of these different events are all given by the confusability matrix. A letter misidentification can lead either to a word misidentification (i.e., a word other than the target) or to an impossibility (i.e., a word absent from the lexicon). An impossibility leads to more attempts at identification. In any case, the letter probabilities have to be updated on each successive "clock" cycle. For example, the probability that the second letter of the word "javel" is an 'a' if it was identified as such on the first processing cycle is 0.33 whereas the probability that it is a 'b' is .005, a 'c' is 0.0075, a 'd' is 0.025, and so on. The probability that the second letter of the word "javel" is an 'a' if it was identified as such on the first two processing cycles is  $1-(1-0.33)^2$  and the probability that it is a 'b' is  $1-(1-0.005)^2$ , a 'c' is  $1-(1-0.0075)^2$ , a 'd' is  $1-(1-0.025)^2$ , and so on. According to information theory, when the level of uncertainty about the identity of the letter at a particular position becomes relatively low (i.e., its probability has been determined to be high relative to contenders), attending to this letter position will provide little additional information about the target word. In that case, a new letter

position or combination of letter positions should be attended. Accordingly, in our simulation, the attention is always directed to the letter position or combination of letter positions that reduce the most the uncertainty regarding the target.

Let us now consider the impact of the second factor involved in our computational analysis, that is the addition of perfect lexical knowledge, on the informativeness of each letter position. According to the BRULEX lexical database (Content, Mousty, & Radeau, 1990), there are 1024 five-letter words without diacritic marks in French. This is less than 0.01% of the maximum number of five-letter words if we consider all possible letters. It is therefore not necessary to identify all letters to identify a word, far from it. The most informative letter positions according to this second factor are those that maximally reduce the number of candidates. To continue with the preceding example, suppose that  $M$  is equal to 2 and that the target word is "javel". Prior to word presentation, the optimal reader only knows that the word is a five-letter word (this was the case in the experiment reported in this article – it is not, of course, a condition of applicability of the model). The two letter positions that are best in jointly minimizing the number of word candidates are 4 and 5. Indeed, there are 12 words with the letters 'a' and 'v' at positions 2 and 3 whereas there are only 6 words with the letters 'e' and 'l' at positions 4 and 5. Therefore, if only lexical knowledge were to be considered, letter positions 4 and 5 are the most informative when the target word "javel" is processed. However, if this factor is to be taken in consideration jointly with that of letter confusability, then the probability for the target to be correctly identified from only two letters becomes  $0.33 * 0.49 * 0.08 = 0.012$  with letter positions 2-3 and  $0.35 * 0.15 *$

0.17 = 0.008 with letter positions 4-5. This leads to the slightly counterintuitive result that the processing of letter positions 2 and 3, which lead to twelve possible words, is more informative than the processing of letter positions 4 and 5, which lead to six possible words.

The computational analysis described above was conducted for both target types. It was conducted with pseudo-words because they were seen five times each on average across the experiment (although they were correctly identified only 2.5 times on average), and this repetitive presentation can possibly have an impact on the knowledge subjects have about these stimuli. Indeed, this repetitive presentation could be sufficient for the visual system to extract the statistical properties of the pseudo-word list and learn to use the most diagnostic positions. The list of stimuli used to conduct the computational analysis for pseudo-words was the same as the one used in the behavioural task.

The analysis was conducted for attentional windows of one to four letters. Significantly, the results with the attentional window of one letter were the most similar to the behavioural results. Figure 4 therefore presents the results of this analysis for an attentional window of one letter, with our lists of words and pseudo-words. It also displays the spatio-temporal modulation of information utilisation in the behavioural tasks in order to facilitate the comparison with the optimal routine. With both lists (words and pseudo-words), the most informative position at the beginning of the processing is letter 1. With the word list, letter 1 was rapidly followed by letter positions 3 and 4, which became more informative than the first letter on cycle 2. It should be kept

in mind that this optimal routine was computed by averaging the 5,000 best attentional routines. Therefore, the higher diagnosticity of letter 1 compared to letters 3 and 4 during the first cycle means that, on average, letter position 1 was the one that reduced the most the uncertainty regarding the target word. In other words, on the 5,000 iterations of the computational analysis, letter 1 was chosen more often than letters 3 and 4 as the most diagnostic position. With the pseudo-word list, letter 1 as the most informative letter position was replaced on cycle 3 by letter positions 4 and 3. The informativeness of letter position 2 became greater than that of letter positions 3 and 4, with the pseudo-word and word lists respectively, after the third cycle.

-----  
Insert Figure 4 near here  
-----

A first point that should be noted in the results of the computational analysis is the higher diagnosticity of letters 1, 3, and 4 during the initial processing cycles. On average, it is optimal to first focus attention on letters 1 or 3 with words (letter 1 or 4 with the pseudo-words), with letter 1 being optimal more often than letter 3 (letter 4 with the pseudo-words), and then on letter 4 (letter 3 with pseudo-words). An analysis of the behavioral data shows that these three letters are also the most useful for the readers we have tested. Indeed, Figure 5 shows the number of pixels per letter, all frames collapsed, that were significantly useful in the word and the pseudo-word identification tasks. This figure was obtained by summing all the significant pixels, across the 24 frames, on each letter position (for example, if there were 24 significant pixels on letter 1 at frame 10 and 13 at frame 12, this sums to a total of 37 pixels for this letter). When the same pixel was

significant on different frames, each occurrence contributed to the sum across frames. With both words and pseudo-words, the number of diagnostic pixels was clearly higher for letters 1, 3, or 4 than for letters 2 or 5. The results thus suggest that the subjects do take advantage of the statistical properties of words, thus allocating more attention to the letter positions that increase the probability of recognising the target word. Thus, to recapitulate, according to the computational analysis, the optimal strategy is to put more weight on the letters 1, 3, and 4 at the beginning of the processing. Congruently, the letters that appeared to receive the most attention by our readers during the first 130 ms of stimulus exposure are the letters 1, 3, and 4.

-----  
Insert Figure 5 near here  
-----

Is it possible that our behavioural results, rather than revealing the attentional routine used by subjects in word and pseudo-word identification, only reveal the relative diagnosticity of the different letter positions? In other words, is it possible that the utilisation of information revealed in our tasks only indicates that the more the letters 1, 3, and 4 are visible, the best the performance will be? The relevance of this question is that this is what would be predicted by a reading model with unlimited capacity parallel processing. The answer to this question is 'no' because we find a modulation through time of the utilisation of letters 1, 3, and 4. Indeed, there are some moments where either letter 1, 3, or 4 is not used efficiently, indicating that even if it was available at that particular moment, it did not help the reading system to succeed in recognising the



stimulus. This can be the case only with an attentional routine within which the allocation of limited resources varies across time.

### GENERAL DISCUSSION

We used the Bubbles method to examine the utilization of visual information through time in word and pseudo-word identification tasks. The spatio-temporal use of information was different for words and pseudo-words. In fact, with words, letters 2 and 4 were the first to become useful (on the temporal window 0-8 ms), rapidly followed by letter 3 (8-17 ms). Letters 3, 4 and 5 (17-25 ms) then became useful, and were joined by letter 1 later (33-42 ms). The usefulness of letter 5 then decreased but letters 1, 3, and 4 remained useful for a relatively long period of time (letter 1: until 83 ms; letter 3: until 108 ms; letter 4: until 133 ms), and were finally followed by letters 1 and 2 (from 133 to 175 ms). The processing ended with the efficient use of letter 4 (from 183 ms until the end of stimulus exposure). With pseudo-words, letter 1 first became useful (42-50 ms), followed by the letter 4. Letter 4 remained useful during a long period of time (from 83 to 125 ms), and was followed by letters 1 and 3 (letter 1: 133-183 ms; letter 3: 133-167 ms) and, finally, by letter 2 (150-175 ms). Although the manner in which the routines unfolded through time were different, the letters that were the most used (1, 3, and 4) were the same for both words and pseudo-words. The main difference across stimulus types was thus the order in which the letters were effectively processed. The number of bubbles that was necessary to achieve 51% of correct responses was clearly lower for words than for pseudo-words, indicating that subjects were more efficient in processing

words than pseudo-words. This suggests that the cognitive system needs less evidence to identify a word than a pseudo-word.

The results do not support the hypotheses of parallel processing with unlimited capacity, parallel processing with limited capacity where the attentional resources are equally distributed on all letter positions, and sequential processing where letters are extracted from left to right. The behavioural data can be explained either by parallel processing with limited capacity, where the attentional resources allocated to each letter position vary across time, or by sequential processing where the extraction of letters does not occur in a left-to-right direction. Moreover, the order of extraction is in part determined by the diagnosticity of the different letter positions.

The results of the computational analysis are clearly not identical to the behavioural data obtained with the bubbles task. In particular, the time course of the attentional routine revealed by the behavioural data does not match exactly the predictions from our computational analysis. At least part of the discrepancies may be accounted by the fact that reading performance, and possibly information extraction strategy, can be influenced by numerous factors that are not accounted for by the simulation such as, lexical frequency, imageability, hemispheric asymmetry and visual. For example, it is possible that the bias of the left hemisphere for verbal stimuli facilitates the visual processing of right hemifield letters; that the letters that are farther from fixation are harder to recognise because of decreased visual acuity; and that the order of letter extraction is affected by these factors. The aim of our computational analysis was not to

mimic exactly the human performance, but rather to verify if the impact of lexical knowledge could explain why the order of information extraction is not from left to right and why some letter positions are more useful than others.

Our computational analysis suggests that it is optimal, with both stimulus types, to give priority of processing to letters 1, 3, and 4. The behavioural data suggests that these letters were the most useful to succeed in the word and pseudo-word identification task. We have suggested, in the preceding section, that the reading system has learned to use the statistical properties of words in order to process them efficiently. Given that our subjects had no prior knowledge of the pseudo-words used in our experimental list, why did they use letters 1, 3, and 4 most efficiently? In fact, with an unknown stimulus, all letter positions have the same diagnosticity.

Two hypotheses can explain the results obtained with pseudo-words. Since the pseudo-words used were very word-like, the subjects could have applied a strategy similar to the one used with words, i.e. allow more resources to the letters 1, 3, and 4. Another possibility is that, since the pseudo-words were each seen five times on average across the experiment (although they were correctly identified only 2.5 times each on average), the subjects could have acquired some knowledge about the list of pseudo-words (i.e., stored an orthographic representation of these stimuli) and learned to use the most diagnostic letters. If the former hypothesis is correct, then the greater use of letters 1, 3, and 4 compared to letters 2 and 5 should be apparent from the very beginning of the

experiment. In contrast, if the latter hypothesis is true, then the greater use of letters 1, 3, and 4 should appear later in the experiment.

Figure 6 shows the number of significantly diagnostic pixels for pseudo-words, all frames combined, for the first and second halves of the experiment. During the first half of the experiment, the letters 1, 3, and 4 are clearly more useful than the other letters. In the second half of the experiment, letters 1, 3, and 4 remain very useful, and letter 2 becomes as useful as letter 1. Since the use of letters 1, 3, and 4 appears at the beginning of the experiment, we can eliminate the hypothesis that the strategy of the subjects was biased by the acquisition of some knowledge about the list of pseudo-words in the course of the experiment. We therefore suggest that letters 1, 3, and 4 were the ones most used in the pseudo-word identification task because the subjects applied a strategy that is usually very efficient with words, that is, allocating more resources to the letter positions that are usually the most diagnostic ones with the five-letter stimuli that they know.

-----  
Insert Figure 6 near here  
-----

The average diagnosticity of each letter position is of course only one factor, among many others, that may determine the attentional movements on words. For example, the planning of the pronunciation of the stimulus may have an impact on the weight attributed to each letter position. Indeed, the consonants, which are known to play an important role in pronunciation planning (Wolf & Robinson, 1976), are more frequently

located in letter positions 1, 3, and 4 in our list of words. It is however unlikely that the higher weight for these letter positions in our behavioural results was only caused by the pronunciation factor. Indeed, given that the most important component in our task was the visual identification of a stimulus, it is more likely that visual constraints rather than phonological ones have influenced the probability of recognition of the stimulus.

Another factor that may have affected the attentional routine is lexical frequency, which has been shown to influence the reading latencies (e.g., see Weekes, 1997). Accordingly, one of the particularity of the pseudo-words is that they all have a null lexical frequency<sup>3</sup>. Albeit similar in some respects to the attentional routine for words (see above), that for non-words was also different in other significant aspects. In particular, the utilization of the different letter positions did not overlap as much in the pseudo-word identification task as it did for words. This could be due to a smaller variability in the routine of information extraction used across pseudo-words than across words. Indeed, the lexical frequency variability across pseudo-words should be null, so it should not influence the routine of information extraction. In contrast, the variability of lexical frequency across words does exist and is occasionally very large, which means that we should expect more variability in the routine revealed in the word recognition task. We plan to assess the influence of variables such as lexical frequency, imageability and the number of letters of words in future studies.

### Conclusion

The expertise of skilled readers with words arises through many years of reading practice. This raises the question of whether the cognitive system, following a prolonged and repetitive exposition to words, could have developed a routine of visual information extraction to maximize the efficiency of word recognition. The present paper used spatio-temporal *Bubbles* to examine the modulation of visual information extraction through time in word and pseudo-word identification tasks, and reports a computational analysis which reveals the optimal routine of information extraction for a system with perfect lexical knowledge. The results do not support the hypotheses of the utilization of a sequential left-to-right strategy or of parallel processing with unlimited capacity. Rather, they argue for a sequential or a parallel processing with limited capacity in which the order of extraction is not restricted to a left-to-right direction. The results show that human subjects take advantage of the statistical properties of words, and learn to award greater weight to the most diagnostic letter positions.

## REFERENCES

- Adolphs, R., Gosselin, F., Buchanan, T. W., Tranel, D., Schyns, P. G. & Damasio, A. R. (2005). A mechanism for impaired fear recognition after amygdala damage. *Nature*, *433*, 68-72.
- Boles, D. B. & Clifford, J. E. (1989). An upper- and lowercase alphabetic similarity matrix, with derived generation similarity values. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *21*, 579-586.
- Bouma, H. (1971). Visual recognition of isolated lower-case letters. *Vision Research*, *11*, 459-474.
- Butler, B. E., Mewhort, D. J. K., & Tramer, S. C. (1987). Location errors in tachistoscopic recognition: Guesses, probe errors or spatial confusions? *Canadian Journal of Psychology*, *41*, 339-350.
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, *10*, 433-436.
- Caldara, R., Rossion, B., Mayer, E., Smith, M., Gosselin, F. & Schyns, P. G. (2005). Does prosopagnosia take the eyes out from faces? Evidence for a defect in the use of diagnostic facial information in a single-case. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*, 1-15.

- Campbelle, A. J., & Mewhort, D. J. K. (1980). On familiarity effects in visual information processing. *Canadian Journal of Psychology*, *34*, 134-154.
- Chauvin, A., Worsley, K. J., Schyns, P. G., Arguin, M., & Gosselin, F. (2005). Accurate statistical tests for smooth classification images. *Journal of Vision*, *5*, 659-667
- Cohen, L. et al. (2003). Visual word recognition in the left ant right hemispheres : Anatomical and functional correlates of peripheral alexias. *Cerebral Cortex*, *13*, 1313-1333.
- Clark, J. J. & O'Regan, J. K. (1999). Word ambiguity and the optimal viewing position in reading. *Vision Research*, *39*, 843-857.
- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P. & Haller, M. (1993). A computational dual route model of reading aloud. *Psychological Review*, *100*, 589-606.
- 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.
- Coltheart, M., & Rastle, K. (1994). Serial processing in reading aloud: Evidence for dual-route models of reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *20*, 1197-1211.



- Content, A., Mousty, P., & Radeau, M. (1990). Brulex. Une base de données lexicales informatisée pour le français écrit et parlé. *L'Année Psychologique*, 90, 551-566.
- Dehaene, S. & Cohen, L. (1994). Dissociable mechanisms of subitizing and counting: neuropsychological evidence from simultanagnosic patients. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 958-975.
- Deubel, H. & Schneider, W. X. (2003). Delayed saccades, but not delayed manual aiming movements, require visual attention shifts. *Oculomotor and Vestibular Systems: Their Function and Disorders*, 1004, 289-296.
- Farid, M. & Grainger, J. (1996). How initial fixation position influences visual word recognition: A comparison of French and Arabic. *Brain and Language*, 53, 351-368.
- Fiset, D., Arguin, M., & McCabe, E. (2006). The breakdown of parallel letter processing in letter-by-letter dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 23, 240-260.
- Geisler, W. & Murray, R. (2003). Practice doesn't make perfect. *Nature*, 423, 696-697.
- Gibson, B. M., Wasserman, E. A., Gosselin, F. & Schyns, P. G. (2005). Applying Bubbles to localize features that control pigeons' visual discrimination behavior. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 31, 376-382.

- Geyer, L. H. (1977). Recognition and confusion of the lowercase alphabet. *Perception & Psychophysics*, 22, 487-490.
- Godijn, R. & Theeuwes, J. (2003). Parallel allocation of attention prior the execution of saccades sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 882-896.
- Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2001). Bubbles: A technique to reveal the use of information in recognition. *Vision Research*, 41, 2261-2271.
- Haber, R. N., & Standing, L. (1969). Location of errors with a post-stimulus indicator. *Psychonomic Science*, 17, 345-346.
- Humphreys, K., Gosselin, F., Schyns, P. G., & Johnson, M. H. (submitted). Applying Bubbles to infant face recognition: Revealing the information used for mother-stranger face discrimination in infants.
- Jonides, J. (1981). Voluntary versus automatic control over the mind's eye's movement. In J. L. A. Baddeley (Ed.), *Attention and Performance IX*. Hillsdale, NJ :Erlbaum.
- Jordan, T. R., Patching, G. R., & Milner, A. D. (2000). Lateralized word recognition: Assessing the role of hemispheric specialization, modes of lexical access, and perceptual asymmetry. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 26, 1192-1208.

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.

Lamberts, K. (2005). Interpretation of orthographic uniqueness point effects in visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 31, 14-19.

Lavidor, M., & Ellis, A. W. (2003). Interhemispheric integration in a split-processing model of visual word recognition. *Cortex*, 39, 69-83.

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

Lavidor M., Ellison A., & Walsh, V. (2003). Examination of a split-processing model of visual word recognition: a magnetic stimulation study. *Visual Cognition*, 10, 341 – 362

Legge, G. E., Ahn, S. J., Klitz, T. S., & Luebker, A. (1997). Psychophysics of reading – XVI. The visual span in normal and low vision. *Vision Research*, 37, 1999-2010.

Legge G.E., Hooven, T.A., Klitz, T.S., Mansfield, J.S., & Tjan, B.S. (2002). Mr. Chips 2002: New insights from an ideal-observer model of reading. *Vision Research*, 42, 2219-2234.

Levin, D. T., & Simons, D. J. (1997). Failure to detect changes to attended objects in motion pictures. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4, 501-506.

McCandliss, B. D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 293-299.

Miller, G. A. (1956). The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information. *Psychological Review*, 63, 81-97

O'Regan, J.K., Levy-Schoen, A., Pynte, J. & Brugailere, B., (1984). Convenient fixation location within isolated words of different length and structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 10, 250-257

O'Regan, J. K. & Lévy-Schoen, A. (1987). Eye movement strategy and tactics in word recognition and reading. In Coltheart, M. (Ed). *Attention and performance XII: the psychology of reading* (pp. 363-38). Hillsdale NJ : Erlbaum.

- Pelli, D. G. (1997). The Video Toolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spatial Vision, 10*, 437-442.
- Pelli, D. G., Burns, C. W., Farell, B., & Moore-Page, D. C. (sous presse). Feature detection and letter identification. *Vision Research*.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 32*, 3-25.
- Rayner, K. (1978). Eye movements in reading and information processing. *Psychological Bulletin, 85*, 618-660.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing : 20 years of research. *Psychological Bulletin, 124*, 372-422.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing : 20 years of research. *Psychological Bulletin, 124*, 372-422.
- Shillcock, R, Ellison, T. M., & Monaghan, P. (2000). Eye-fixation behavior, lexical storage, and visual word recognition in a split processing model. *Psychological Review, 107*, 824-851.
- Sereno, S. C., & Rayner, K. (2000). The when and where of reading in the brain. *Brain and Cognition, 42*, 78-81.

- Sereno, S. C., Rayner, K., & Posner, M. I. (1998). Establishing a time-line of word recognition: evidence from eye-movements and event-related potentials. *NeuroReport*, 9, 2195-2200.
- Simons, D. J., & Rensink, R. A. (2005). Change blindness: past, present and future. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 16-20.
- Smith, M., Cottrell, G., Gosselin, F. & Schyns, P. G. (2005). Transmitting and decoding facial expressions of emotions. *Psychological Science*, 16, 184-189
- Smith, M. L., Gosselin, F. & Schyns, P. G. (submitted). Oscillatory dynamics of discrete feature processing epochs in the brain over the time course of face categorizations.
- Stevens, M. & Grainger, J. (2003). Letter visibility and the viewing position effect in visual word recognition. *Perception & Psychophysics*, 65, 133-151.
- Vinette, C., Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2004). Spatio-temporal dynamics of face recognition in a flash: It's in the eyes! *Cognitive Science*, 28, 289-301.
- Van der Heijden, A. H. C. (1987). Central selection in vision. Dans H. Heuer & A. F. Sanders (Eds.), *Perspectives on perception and action* (pp. 421-446). Hillsdale, NJ : Erlbaum.

Van der Heijden, A. H. C. (1992). *Selective attention in vision*. London: Routledge.

VanRullen, R. & Koch, C. (2003). Is perception discrete or continuous? *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 207-213.

Watson, A. B. & Pelli, D. G. (1983) QUEST: a Bayesian adaptive psychometric method. *Percept Psychophys*, 33 (2), 113-20.

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

Whitney, C. (2001). How the brain encodes the order of letters in a printed word : The SERIOL model and selective literature review. *Psychonomic Bulletin and Review*, 8, 221-243.

Wolf, C. G., & Robinson, D. O. (1976). Use of spelling-to-sound rules in reading. *Perceptual and Motor Skills*, 43, 1135-1146

## FOOTNOTES

1. The decision to modify the word contrast rather than the number of bubbles in order to maintain the performance at 50% correct was determined by the need to avoid excessively long inter-trial intervals. Indeed, the on-line generation of each stimulus that was required when we allowed a change in the number of bubbles on a trial-by-trial basis took approximately 8 seconds. By generating the noise (i.e. a matrix composed of the position of each bubble in space and time) for each trial before the experiment, the time required to prepare the upcoming trial was divided at least by two.

2. The letter confusability matrix was obtained by asking 10 normal participants from the Université de Montréal to identify 520 lowercase letters printed in 36-points Arial (screen resolution was 1024 x 768 pixels at 120 Hz) and embedded in white Gaussian noise. The maximum visual angle subtended by the stimuli was of 0.9 (horizontally) x 0.11 (vertically) degrees. The participants' performance was maintained at 50% by manipulating noise density. Each trial began with a fixation point presented at the center of the screen during 750 ms, which was followed by a 250 ms blank screen. A letter was then displayed at the center of the screen during 33.33 ms and was immediately replaced by a 250 ms blank screen. The task of the participants was to name the target as accurately as possible. After each response, an experimenter registered the subject's response via the computer keyboard and then triggered the next trial by pressing the «ENTER» key.



3. The pseudo-words have an a priori lexical frequency of zero. However, they were presented five times (but correctly recognised 2.5 times each on average) each on average in our task, so their actual frequency for subjects increased as the experiment progressed.

**TABLES**

Table 1. Confusability matrix (part 1).  
 Lines represent the stimuli presented and columns, the probability of response of each letter of the alphabet

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>g</b>	<b>h</b>	<b>I</b>	<b>j</b>	<b>k</b>	<b>l</b>	<b>m</b>
<b>a</b>	0.33	0.02	0.025	0.0275	0.085	0.0025	0.08	0.035	0.015	0.005	0	0	0.0175
<b>b</b>	0.005	0.5475	0.03	0.0225	0.015	0	0.015	0.11	0	0	0.0075	0.0075	0.005
<b>c</b>	0.0075	0.02	0.555	0.0275	0.04	0.01	0.075	0.0075	0.005	0.0025	0	0	0.01
<b>d</b>	0.025	0.01	0.085	0.5725	0.0225	0	0.0425	0.015	0.005	0.015	0.0025	0	0.0075
<b>e</b>	0.05	0.0325	0.1325	0.0125	0.345	0	0.0875	0.01	0.005	0.0075	0	0	0.01
<b>f</b>	0.015	0.0025	0.01	0.015	0.0075	0.31	0.0175	0.0075	0.1075	0.05	0.025	0.0925	0.005
<b>g</b>	0.0075	0.0125	0.025	0.0025	0.01	0.0025	0.6375	0.0075	0.0025	0.0325	0.0025	0.0025	0
<b>h</b>	0.0025	0.0575	0.0125	0.005	0.005	0.01	0.01	0.5875	0.0025	0.005	0.0525	0.0025	0.0125
<b>I</b>	0.01	0.0075	0.0225	0.0075	0.0025	0.08	0.02	0.045	0.1525	0.0825	0.0375	0.1075	0.015
<b>j</b>	0.0125	0.0025	0.01	0.0175	0.005	0.0725	0.05	0.0275	0.11	0.3125	0.0075	0.1225	0.005
<b>k</b>	0.0075	0.0075	0.0075	0.0025	0.005	0.0075	0.01	0.0275	0.0025	0	0.7625	0.015	0
<b>l</b>	0.0175	0.0125	0.01	0.0175	0	0.075	0.02	0.035	0.1275	0.105	0.03	0.15	0.01
<b>m</b>	0.0075	0	0.0075	0	0.0025	0.005	0.0075	0.0125	0.005	0	0.0075	0.005	0.82
<b>n</b>	0.0275	0.0025	0.0175	0.01	0.015	0.005	0.005	0.12	0.005	0.005	0.0075	0	0.0375
<b>o</b>	0.03	0.0375	0.1325	0.0525	0.0325	0	0.075	0.02	0.0025	0.0125	0.005	0	0.0075
<b>p</b>	0.0075	0.0225	0.0125	0.01	0.0225	0.01	0.0325	0.0125	0.005	0	0.005	0	0
<b>q</b>	0.015	0.005	0.06	0.035	0.015	0.0025	0.1175	0.02	0.0025	0.005	0.0025	0.0025	0.0075
<b>r</b>	0.005	0.0025	0.0575	0.0075	0.005	0.1225	0.0175	0.015	0.0575	0.0275	0.0325	0.0375	0.005
<b>s</b>	0.0325	0.02	0.0475	0.01	0.0575	0.0025	0.0825	0.0075	0.0125	0.0125	0.015	0.0025	0.0075
<b>t</b>	0.005	0.0075	0.0275	0.01	0.01	0.145	0.02	0.035	0.12	0.0325	0.0325	0.0975	0.0075
<b>u</b>	0.0225	0.02	0.0175	0.0175	0.01	0.0025	0.045	0.0175	0.0025	0.0125	0.0125	0.0125	0.02
<b>v</b>	0	0.005	0.005	0.01	0	0.0075	0.01	0.0025	0.005	0.005	0.0075	0.0025	0.02
<b>w</b>	0.005	0.0025	0	0	0.0075	0	0.0025	0.005	0	0	0.005	0	0.005
<b>x</b>	0.01	0	0.0125	0.0025	0	0.01	0.005	0.005	0.015	0.01	0.075	0.0125	0.0075
<b>y</b>	0.0025	0	0	0.0025	0.0025	0.015	0.0025	0	0	0.0125	0.005	0.0025	0.0025
<b>z</b>	0.0025	0.0025	0.0025	0	0.0125	0.015	0.035	0.0125	0.005	0.0125	0.0125	0.015	0.005

Table 1. Confusability matrix (part 2).

	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z
a	0.1025	0.0625	0.025	0.0125	0.0125	0.055	0.0075	0.03	0.0025	0.0125	0.015	0.0025	0.0175
b	0.0575	0.025	0.065	0.005	0.0025	0.015	0.0075	0.0275	0.015	0.0025	0.005	0.0075	0
c	0.035	0.0775	0.0225	0.0125	0.035	0.0075	0.0075	0.015	0.015	0.005	0.0025	0.0025	0.0025
d	0.03	0.0525	0.0075	0.02	0.005	0.005	0.005	0.0525	0.01	0.005	0	0.0025	0.0025
e	0.0375	0.0875	0.02	0.0175	0.045	0.015	0.0025	0.04	0.0125	0.02	0.0025	0.0075	0
f	0.0125	0.0075	0.02	0	0.14	0.005	0.0575	0.0075	0.0125	0.0025	0.0075	0.055	0.0075
g	0.015	0.0325	0.0375	0.05	0.0125	0.04	0	0.05	0.005	0.005	0	0.005	0.0025
h	0.165	0.0075	0.01	0	0.02	0.0025	0.0075	0.0025	0	0.0075	0.0025	0.01	0
I	0.04	0.01	0.0175	0.0125	0.095	0.0125	0.0475	0.0225	0.0325	0.02	0.0125	0.08	0.0075
j	0.015	0.01	0.025	0.005	0.035	0.01	0.0425	0.0125	0.02	0.005	0.01	0.0525	0.0025
k	0.0075	0.0025	0.0175	0	0.0275	0.005	0.0075	0.0075	0.0125	0.0075	0.04	0.01	0
l	0.0425	0.005	0.0225	0.0075	0.14	0.0025	0.05	0.01	0.04	0.0125	0.0125	0.035	0.01
m	0.065	0.0075	0.005	0	0.025	0	0.0025	0.005	0.005	0.005	0	0	0
n	0.6	0.0325	0.0275	0.005	0.04	0.0025	0.0025	0.0175	0.0025	0.01	0	0	0.0025
o	0.05	0.3225	0.0675	0.055	0.0075	0.0125	0.0075	0.045	0.0125	0.005	0	0.005	0.0025
p	0.0525	0.025	0.7125	0.0075	0.0275	0.0025	0.0125	0.005	0.0075	0.005	0	0.0025	0
q	0.0575	0.03	0.0125	0.525	0.015	0.015	0.0025	0.035	0.0075	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
r	0.04	0.005	0.015	0.0025	0.3925	0.0025	0.045	0.0025	0.0125	0.005	0.01	0.065	0.01
s	0.035	0.0225	0.035	0.0025	0.0175	0.5125	0.0075	0.0275	0.01	0.005	0.0075	0.005	0.0025
t	0.0175	0.005	0.0175	0.005	0.14	0.015	0.1325	0.0025	0.02	0.0075	0.0175	0.0575	0.0125
u	0.04	0.0275	0.02	0.0225	0.01	0.0125	0.005	0.565	0.0425	0.035	0	0.0075	0
v	0.0075	0.005	0.0075	0	0.01	0.0025	0	0.01	0.485	0.03	0.0225	0.34	0
w	0.0075	0.0025	0.005	0	0	0	0.0025	0	0.0525	0.875	0.0025	0.02	0
x	0.01	0.0025	0.005	0.0025	0.0375	0.0075	0.005	0.0025	0.03	0.0125	0.5325	0.1725	0.015
y	0.005	0	0	0	0.005	0	0	0	0.06	0.005	0.0075	0.8675	0.0025
z	0.0025	0.01	0.0075	0	0.0375	0.005	0.005	0.005	0.0025	0.0025	0.04	0.025	0.725

## FIGURE CAPTIONS

**Fig. 1.** Example of the stimuli presented in the experiment. Each grey rectangle represents one of the 24 successive frames of the stimulus. Each frame was presented for 8.33 ms, resulting in a total stimulus duration of 200 ms.

**Fig. 2.** Results of the word identification task. The white blobs represent the pixel locations of the information that was efficiently used. The stimulus in each square was constructed by the superimposition of four letter strings (dddd, bbbb, pppp, qqqq) in order to show the complete spatial extent that could be covered by a stimulus.

**Fig. 3.** Results of the pseudo-word identification task. The white blobs represent the information that was efficiently used. Conventions are the same as in Fig. 2.

**Fig. 4.** Average best attentional deployment of attention as revealed by the computational analysis (left side) and number of diagnostic pixels per letter, on each frame (right side). The results of the word task are on the top panel and the results for the pseudo-word task are on the bottom panel.

**Fig. 5.** Number of diagnostic pixels per letter, all frames collapsed, in a) the word identification task b) the pseudo-word identification task

**Fig. 6.** Number of diagnostic pixels per letter, all frames collapsed, in the pseudo-words task for a) the first half b) the second half of the task

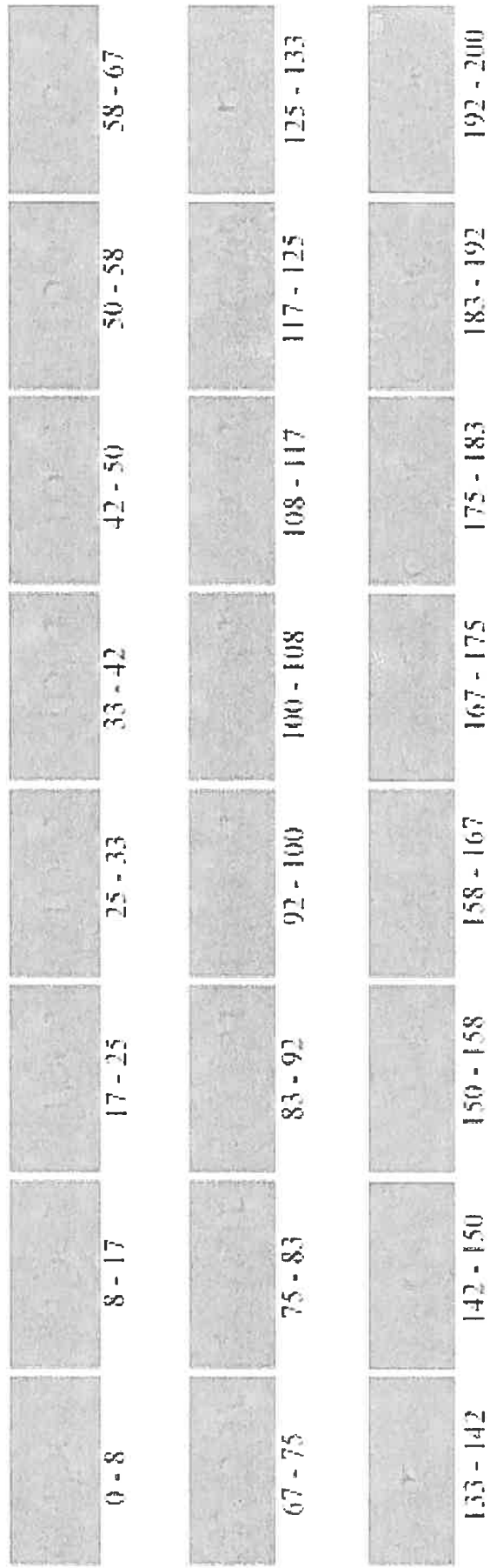


Figure 1.

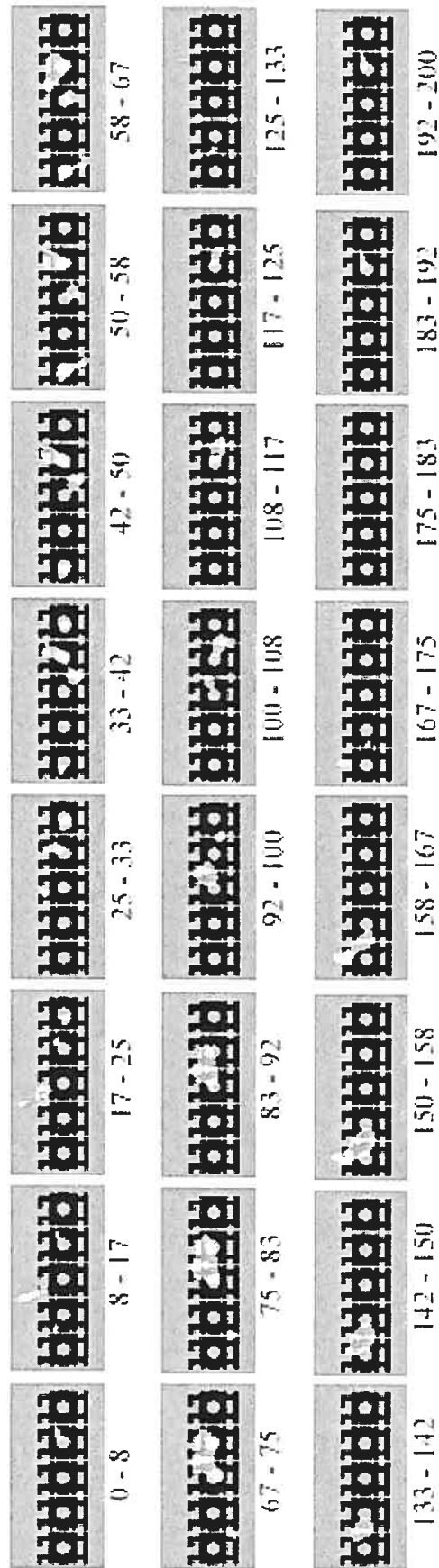


Figure 2.

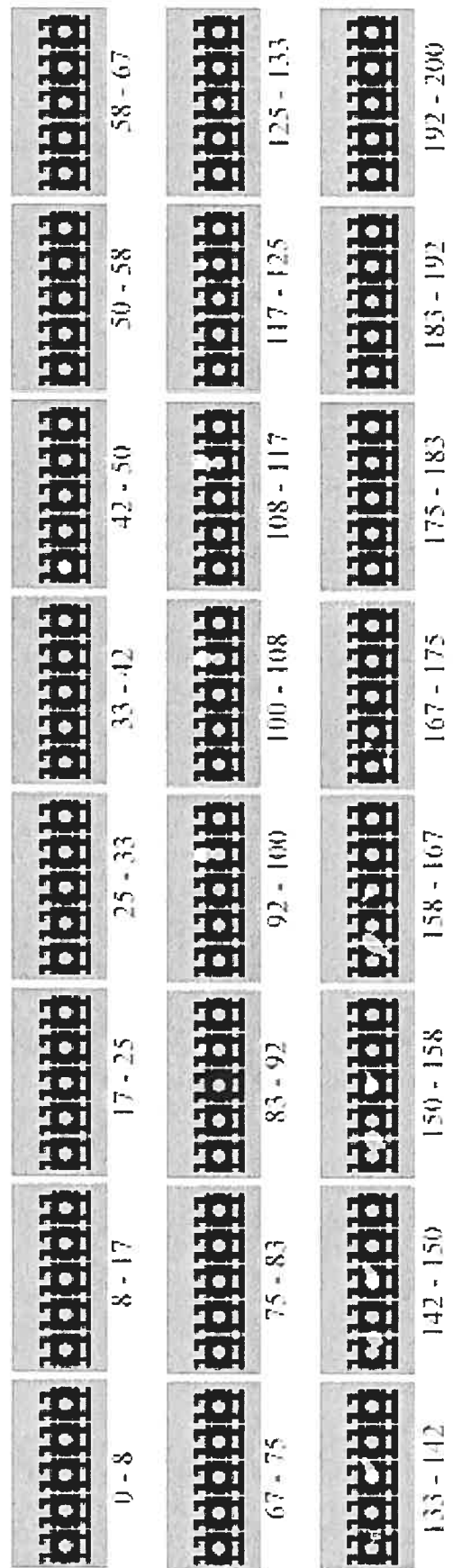


Figure 3



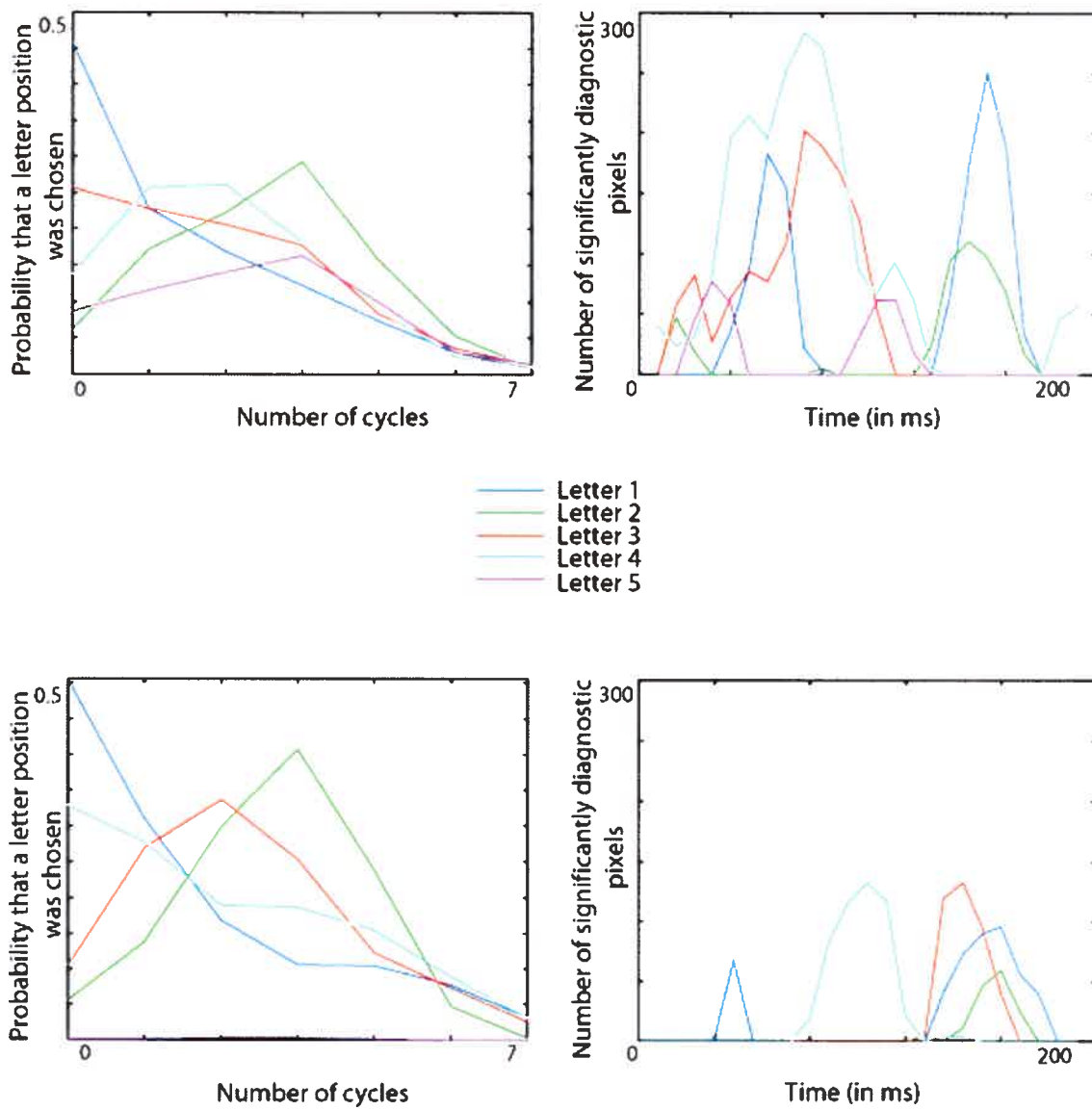


Figure 4.

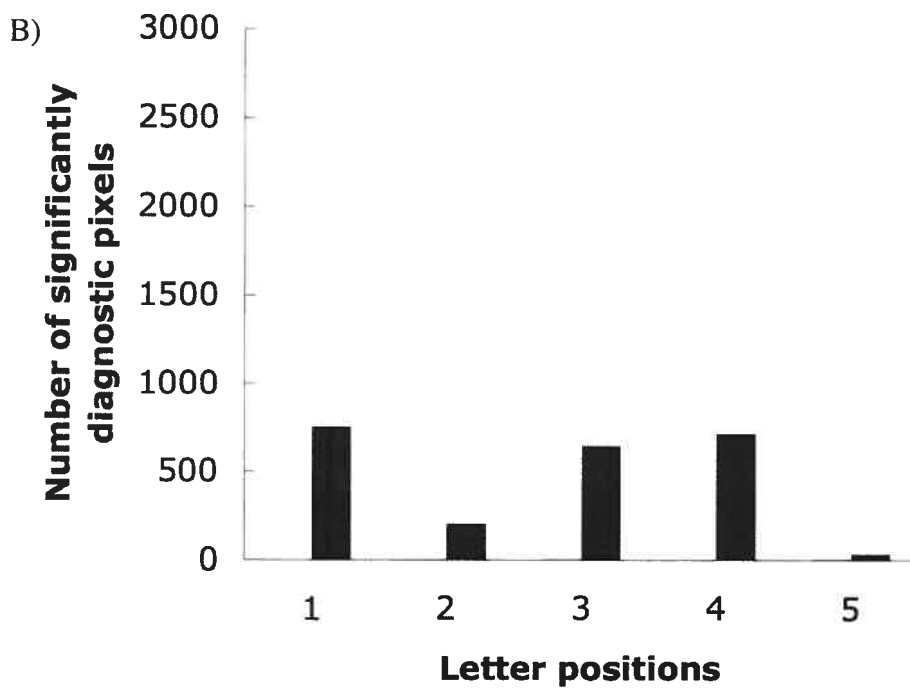
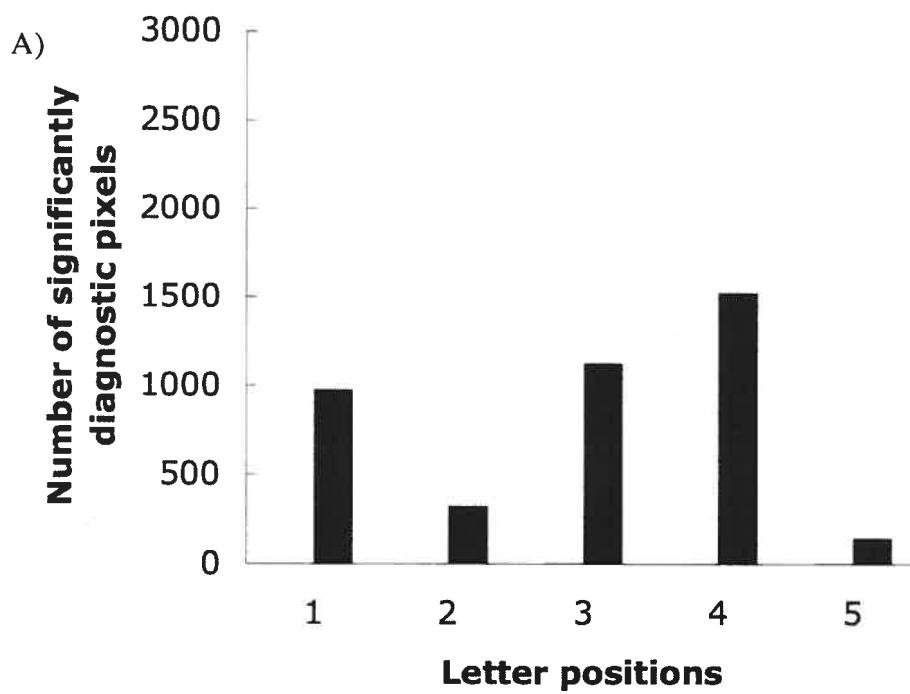


Figure 5.

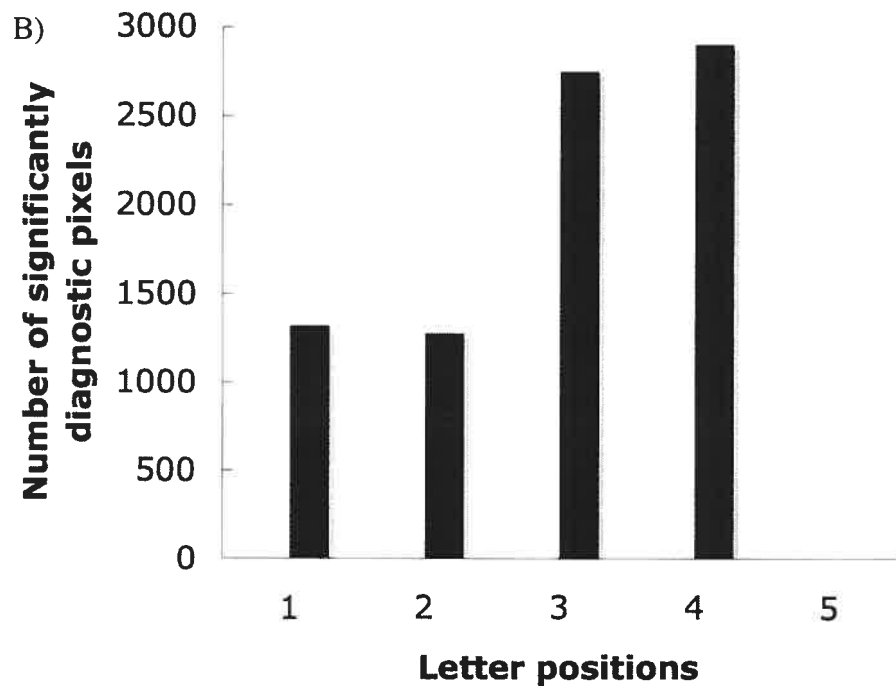
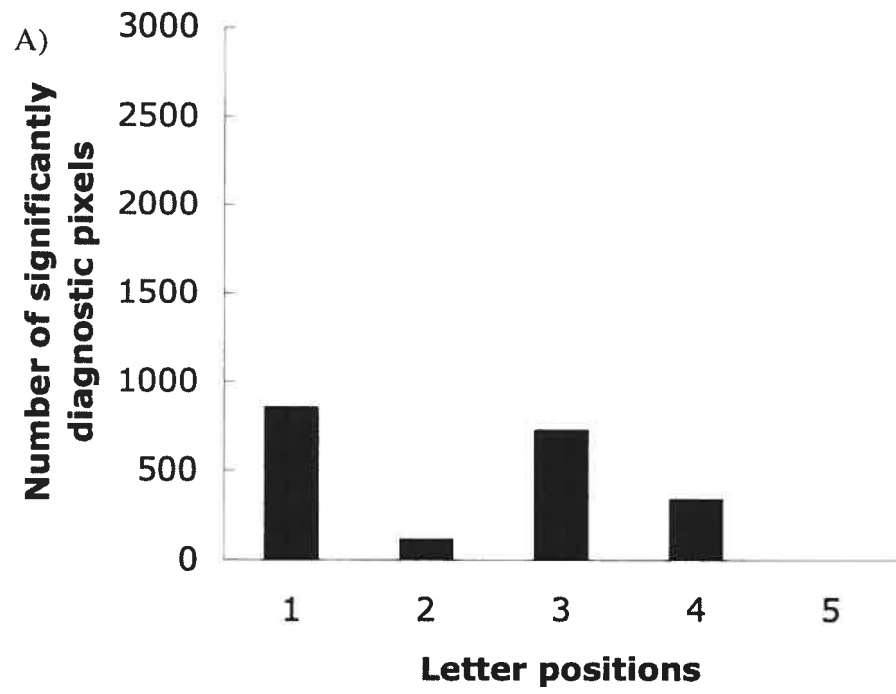


Figure 6.

## **TROISIÈME CHAPITRE**

Discussion générale

La présente étude a utilisé la méthode des bulles pour examiner l'utilisation de l'information à travers le temps dans des tâches de reconnaissance de mots et de pseudo-mots. Dans la tâche de reconnaissance de mots (voir Figure 2 dans l'article), les lettres 2 et 4 (i.e. elles apparaissent durant la fenêtre temporelle 0-8 ms) sont les premières à être utilisées efficacement, rapidement suivies par la lettre 3 (fenêtre temporelle 8-17 ms). Les lettres 3, 4 et 5 deviennent utiles 17 ms après l'apparition du stimulus et la lettre 1 se joint à elles durant la fenêtre temporelle 33-42 ms. La lettre 5 cesse ensuite d'être utilisée, mais les lettres 1, 3 et 4 demeurent utiles durant un long moment (lettre 1 : entre 33 et 83 ms suivant la présentation du stimulus; lettre 3 : entre 8 et 108 ms; lettre 4 : du début jusqu'à 130 ms après l'apparition du stimulus). Les lettres 1 et 2 deviennent utiles à nouveau entre 133 et 175 ms après la présentation du stimulus et le traitement se termine finalement par l'utilisation de la lettre 4. Dans la tâche de reconnaissance de pseudo-mots (voir Figure 3 dans l'article), la lettre 1 est utilisée efficacement 42 ms après l'apparition du stimulus, suivie par la lettre 4 durant la fenêtre temporelle 83-92 ms. La lettre 4 demeure utile jusqu'à 125 ms après l'apparition du stimulus et est immédiatement suivie des lettres 1 et 3 (lettre 1 : 133 à 183 ms; lettre 3 : 125-167 ms), puis et de la lettre 2 (entre 150 et 175 ms suivant l'apparition du stimulus).

#### HYPOTHÈSES DE TRAITEMENT SÉRIEL VS. PARALLÈLE

Tel que mentionné dans l'Introduction, les auteurs qui favorisent l'hypothèse du traitement séquentiel se divisent en deux groupes. D'une part, ceux qui suggèrent que cette forme de traitement est utilisée avec certaines classes de mots seulement, par

exemple les pseudo-mots et les non-mots (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001; Coltheart & Rastle, 1994). D'autre part, ceux qui suggèrent l'utilisation du traitement séquentiel avec toutes les classes de stimuli verbaux (Kwantes & Mehwort, 1999; Whitney, 2001). Dans les deux cas, la proposition est à l'effet que le traitement séquentiel s'effectue de la gauche vers la droite.

Les résultats obtenus avec la méthode des bulles dans la tâche de reconnaissance de mots vont à l'encontre des hypothèses de traitement sériel s'effectuant de la gauche vers la droite. En effet, contrairement à l'hypothèse de Whitney (2001), qui suggère une utilisation de cette forme de traitement même avec les mots, le déploiement de l'attention dans la tâche de reconnaissance de mots ne s'effectue pas de la gauche vers la droite mais débute plutôt au centre et sur la partie droite du mot, pour ensuite se partager entre les positions 1 d'une part et 3 et 4 d'autre part. De plus, le déplacement de l'attention ne se fait pas nécessairement de manière continue, ou analogue, en passant de façon séquentielle par les lettres adjacentes, mais peut plutôt sauter de manière discrète vers des positions non-adjacentes en omettant les localisations intermédiaires.

L'hypothèse du modèle modulaire selon laquelle les pseudo-mots sont traités de manière séquentielle de la gauche vers la droite (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001; Coltheart & Rastle, 1994) est elle aussi contredite par les résultats obtenus avec la méthode des bulles dans la tâche d'identification de pseudo-mots. En effet, malgré que le traitement des pseudo-mots débute sur la lettre 1, la deuxième lettre à être utilisée

efficacement est la lettre 4, contrairement à ce qui est prédit par l'hypothèse de traitement séquentiel gauche-droite.

L'hypothèse d'un traitement en parallèle à capacité illimitée est également remise en question par les résultats de notre étude. En effet, l'utilisation d'une telle stratégie implique que, puisque l'attention est distribuée sur toutes les lettres à tous les moments, une lettre devrait être traitée efficacement dès qu'elle est révélée par un masque de bulles. Le moment auquel cette lettre est révélée ne devrait donc pas avoir d'impact sur la probabilité de sa reconnaissance. Avec la méthode des bulles, toutes les lettres sont en moyenne révélées à plusieurs reprises à chacun des moments possibles de la présentation du stimulus. Un traitement en parallèle à capacité illimitée prédit donc une routine moyenne dans laquelle toutes les lettres sont utiles à tous les moments, ce qui n'est clairement pas le cas des routines obtenues dans notre étude.

Les résultats obtenus dans la présente étude peuvent s'expliquer soit par une hypothèse de traitement séquentiel qui ne s'effectue pas de la gauche vers la droite, soit par une hypothèse de traitement en parallèle à capacité limitée; i.e. où seulement un sous-ensemble des lettres du mot peut être traité simultanément. Les analyses effectuées jusqu'à maintenant ne permettent pas de trancher entre ces hypothèses. Les films de classification observés avec les deux classes de mots indiquent un traitement simultané de deux ou plusieurs lettres à certains moments, ceci étant plus marqué pour les mots que les non-mots. Cependant, ce chevauchement ne permet pas de conclure à un traitement parallèle. En effet, bien que la présence simultanée des lettres 2 et 3 dans les

résultats peut signifier que ces deux lettres sont utilisées conjointement, il est également possible que des lettres utilisées indépendamment à travers les essais apparaissent au même moment dans la routine moyenne finale. Par exemple, la présence simultanée des lettres 2 et 3 dans la routine finale peut se produire si dans la moitié des essais la lettre 2 est utilisée seule et, dans l'autre moitié la lettre 3 est utilisée seule. Une analyse de second degré serait requise pour vérifier la présence d'utilisation conjointe de lettres. Cependant, l'application d'une telle analyse exige un nombre d'essais nettement supérieur à celui recueilli ici, qui s'avère déjà exceptionnellement élevé.

#### ORDRE D'EXTRACTION DES LETTRES

Dans les langues latines et germaniques, la lecture s'effectue de la gauche vers la droite. Pourquoi, dans ce cas, l'extraction des lettres ne s'effectue-t-elle pas dans cet ordre? L'hypothèse soulevée dans la présente étude propose que le système de lecture apprend à utiliser les propriétés statistiques des mots de manière à les traiter le plus efficacement possible. En effet, le nombre de mots qui existent dans une langue constitue une infime partie du nombre de séquences de lettres pouvant être créé à partir des 26 lettres de l'alphabet. Ainsi, il n'est souvent pas nécessaire de regarder toutes les lettres d'un mot avant de pouvoir le reconnaître. De plus, il est possible que certaines positions de lettre dans un mot soient en moyenne plus informatives que d'autres. Par exemple, si vous tentez de deviner les deux mots suivants : b \_ n \_ \_ et \_ e \_ \_ e, vous remarquerez que le nombre de candidats possible est beaucoup plus limité pour le premier mot que pour le deuxième. Dans ces deux mots, les positions 1 et 3 sont plus informatives que les positions 2 et 5. Il est possible qu'une certaine systématisme des positions les plus



diagnostiques existe à travers tous les mots d'une langue, et que le système de lecture tire avantage de cette systématique pour traiter efficacement les mots.

L'analyse computationnelle présentée dans l'article a permis de vérifier quelle est la stratégie optimale d'extraction de l'information (voir Figure 4 dans l'article) étant donné des connaissances lexicales parfaites. Cette analyse suggère qu'il est optimal de traiter les lettres 1, 3 et 4 au début de la présentation du stimulus, la lettre 1 étant la plus souvent optimale, suivie de la lettre 3 (4 pour les pseudo-mots) puis de la lettre 4 (3 pour les pseudo-mots). Les résultats de l'analyse computationnelle suggèrent donc l'existence d'une systématique de la valeur informative des différentes positions de lettres. Les résultats comportementaux obtenus montrent que les lettres 1, 3 et 4 sont les plus utilisées durant les 130 premières ms suivant l'apparition du stimulus (voir Figure 6 dans l'article). Cette correspondance entre les résultats comportementaux et l'analyse computationnelle suggère que le système de lecture mature utilise les propriétés statistiques des mots et accorde plus de poids aux lettres les plus diagnostiques. Soulignons à cet égard que des analyses computationnelles telles que celle décrite ici ont également été effectuées sur les mots de 4 à 8 lettres. Pour toutes les longueurs de mots, les résultats indiquent que la stratégie optimale consiste à traiter les lettres 1, 3 et 4 d'abord. Si la diagnosticité des lettres joue un rôle important dans la routine d'extraction de l'information, une étude utilisant la méthode des bulles avec différentes longueurs de mots devrait toujours révéler une plus grande utilisation de ces positions de lettres. L'utilisation prioritaire des lettres 1, 3 et 4 pour ces différentes longueurs de mots pourrait également être une explication possible de l'absence d'effet de longueur de

mots chez les lecteurs expérimentés. En effet, il est possible que le nombre de lettres à traiter pour atteindre une probabilité de reconnaissance donnée varie peu d'une longueur à l'autre, donnant ainsi lieu à des temps de lecture similaires pour les différentes longueurs de mot. Une expérience impliquant la méthode des bulles avec différentes longueurs de mots fera l'objet d'études futures.

La diagnosticité des différentes positions de lettres n'est certainement pas le seul facteur qui influence le déploiement de l'attention sur les mots et les pseudo-mots. Par exemple, il est également possible que la planification de la prononciation joue un rôle dans la routine d'extraction de l'information observée. En effet, les consonnes, qui jouent un rôle important dans la planification de la prononciation, sont en moyenne plus souvent situées aux positions de lettres 1, 3 et 4. Par contre, ce facteur ne peut expliquer à lui seul la routine observée. Étant donné la difficulté de la tâche, les sujets devaient concentrer leur attention aux positions qui augmentaient leur probabilité de réussite. Ainsi, si les positions de lettres importantes pour la planification de la prononciation n'avaient pas été suffisantes pour augmenter la probabilité de reconnaissance visuelle du mot, ces dernières n'auraient pas été révélées dans la routine moyenne puisqu'elles n'auraient pas permis aux sujets de réussir la tâche. Par contre, le fait que les positions de lettres les plus diagnostiques soient en plus celles qui facilitent la planification de la prononciation augmente probablement d'autant plus leur influence sur la stratégie d'extraction de l'information.

Il est possible également que la fréquence lexicale ait influencé la routine d'extraction de l'information. D'ailleurs, il est possible que ce facteur explique en partie la différence de

routine entre les mots et les pseudo-mots. En effet, une des principales caractéristiques distinguant les pseudo-mots des mots est leur fréquence lexicale initiale (en tout début d'expérience) nulle. Dans la routine utilisée pour reconnaître les pseudo-mots, les différentes positions de lettres se chevauchent moins à travers le temps que dans la routine utilisée pour reconnaître les mots. Cette différence pourrait s'expliquer par une plus faible variabilité de l'information utilisée pour reconnaître les pseudo-mots que pour reconnaître les mots. Étant donné que la fréquence lexicale varie peu à travers les pseudo-mots alors qu'elle varie de manière considérable à travers les mots, on peut s'attendre, si la fréquence lexicale influence la routine attentionnelle, à une plus grande variabilité de l'information utilisée pour reconnaître les mots que pour reconnaître les pseudo-mots.

#### LES BATTEMENTS ATTENTIONNELS

Il existe de plus en plus de démonstrations à l'appui de l'hypothèse selon laquelle notre perception repose parfois sur des processus discrets, i.e. impliquant un échantillonnage périodique plutôt que continu de l'information (VanRullen & Koch, 2003). Cette hypothèse implique que la probabilité que l'information visuelle soit traitée efficacement dépend du moment auquel elle est disponible. En d'autres mots, l'information révélée par les masques de bulles durant un « creux » du processus d'échantillonnage ne sera pas traitée efficacement. À l'appui de cette hypothèse, une analyse des scores Z moyens à travers le temps (voir Figure 6) suggère la présence d'oscillations périodiques avec une fréquence d'environ 10 Hz dans l'échantillonnage de l'information pour identifier les mots et les pseudo-mots.

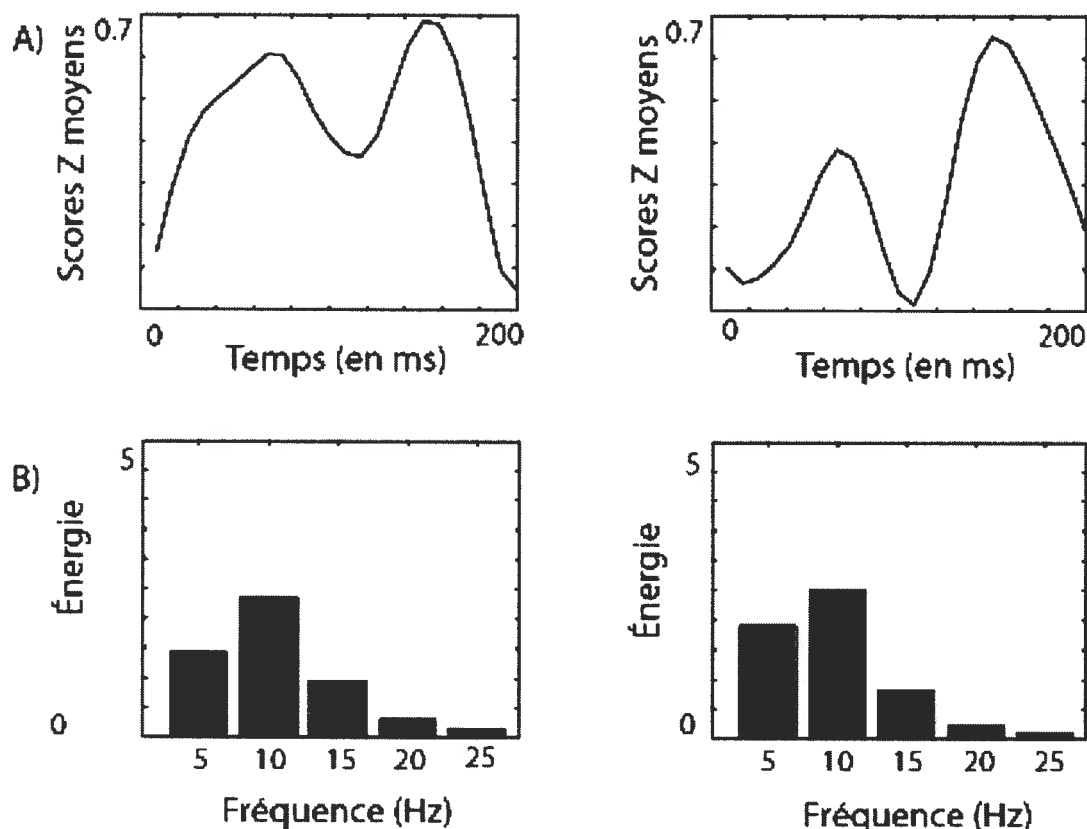


Figure 6. A) Scores Z moyens sur l'ensemble du mot à travers le temps. B) Énergie dans chaque fréquence temporelle des oscillations.

L'application de la même analyse sur les lettres individuelles suggère la présence d'oscillations dans le processus d'extraction de l'information dont la fréquence varie selon la position de lettre et la lexicalité du stimulus (voir Figure 7). Une analyse qualitative de la Figure 7A suggère la présence d'au moins deux cycles pour chaque position de lettre. Une analyse de Fourier de ces données (voir Figure 7B) permet de déterminer la quantité d'énergie pour chacune des fréquences et montre qu'avec les mots, l'oscillation à 10 Hz (i.e. deux cycles de traitement) est la plus énergétique pour les lettres 1 et 4 seulement. Avec les pseudo-mots, à l'exception de la position 5 (qui est particulièrement peu diagnostique), la fréquence d'oscillation à 10 Hz est la plus

énergétique pour les positions de lettre 1 à 4. Ces observations, en plus d'appuyer l'hypothèse d'un échantillonnage discret plutôt que continu, appuient l'hypothèse selon laquelle le système de lecture attribue les ressources de traitement de manière non-uniforme sur les différentes positions de lettre.

Une hypothèse pouvant expliquer le fait que la majorité des lettres présentent deux cycles pour les pseudo-mots alors que c'est le cas de deux lettres seulement avec les mots est que la vitesse de la prise d'information varie selon la difficulté visuelle et la quantité d'information nécessaire pour réussir la tâche. En effet, tel que mentionné dans l'article, le nombre de bulles nécessaire pour maintenir une performance de 51% est significativement plus élevé avec les pseudo-mots qu'avec les mots, ce qui suggère que le système de lecture a besoin de plus d'information pour reconnaître un pseudo-mot qu'un mot. De plus, les sujets ne disposent pas de connaissances préalables sur les pseudo-mots, donc la diagnosticité des lettres ne devrait pas varier d'une position à l'autre. En effet, lorsqu'un sujet traite une séquence de lettres absente du lexique, le fait de savoir que la troisième lettre est, par exemple, un « s » ne lui donne aucune indication quant à l'identité des autres lettres. Au contraire, avec les mots, certaines positions de lettres sont hautement diagnostiques et permettent ainsi de prédire l'identité des autres lettres. Ainsi, il est possible que le nombre moyen d'oscillations plus élevé pour les lettres des pseudo-mots tienne au fait que toutes les lettres apportent autant d'information les unes que les autres. Au contraire, avec les mots, certaines lettres apportent plus d'information que d'autres et ce sont ces dernières qui présentent deux

cycles<sup>4</sup>. Cette explication est toutefois spéculative et d'autres analyses et expériences devront être menées pour la vérifier.

---

<sup>4</sup> Selon l'analyse computationnelle présentée dans l'article, ce sont les lettres 1, 3 et 4 qui sont les plus diagnostiques alors que seules les lettres 1 et 4 présentent deux cycles selon les données comportementales. Par contre, la Figure 7B montre que pour la lettre 3, même si la fréquence à 5 Hz est la plus énergétique, l'énergie de la fréquence 15 Hz est relativement élevée elle aussi.

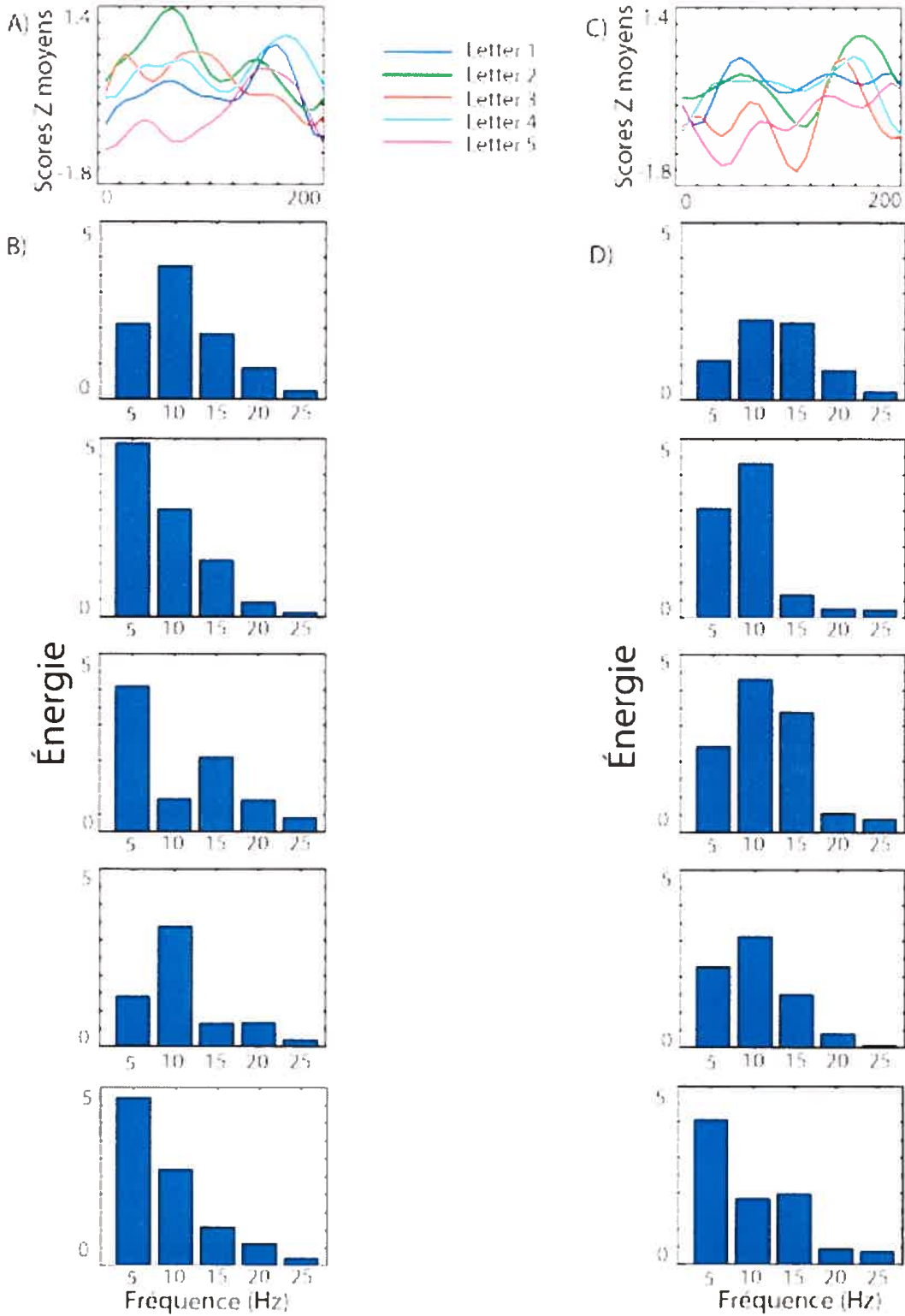


Figure 7. Scores Z moyens par position de lettre à travers le temps pour les mots (A) et pour les pseudo-mots (C) et énergie dans chaque fréquence temporelle des oscillations (B, D; les lettres 1 à 5 sont présentées du haut vers le bas).

## CONCLUSION

Dans la présente étude, la méthode des bulles a été utilisée afin d'examiner l'utilisation de l'information à travers le temps dans des tâches de reconnaissance de mots et de pseudo-mots. Les résultats vont à l'encontre des hypothèses de traitement parallèle à capacité illimitée ou de traitement sériel pour lequel l'ordre d'extraction des lettres s'effectue systématiquement de la gauche vers la droite. Les routines d'extraction de l'information révélées par notre étude suggèrent plutôt soit un traitement en parallèle à capacité limitée quant au nombre de lettres qui peuvent être encodées simultanément (commentaire : une forme alternative de limite de capacité serait un ralentissement progressif du traitement parallèle avec le nombre de lettres examinées en même temps qui permettrait néanmoins le traitement simultané de toutes les lettres), soit un traitement sériel dont l'ordre d'extraction ne s'effectue pas nécessairement de la gauche vers la droite. Dans les deux cas, le poids accordé à chacune des positions de lettres et l'ordre d'extraction de ces dernières est déterminé par la quantité d'information qu'elles contiennent quant à l'identité du stimulus. En effet, une analyse computationnelle révèle que, pour un système à capacité limitée ayant des connaissances lexicales parfaites, certaines positions de lettres sont en moyenne plus diagnostiques que d'autres. Nous suggérons que les sujets utilisent cette propriété statistique des mots afin d'augmenter leur efficacité à les reconnaître.



## RÉFÉRENCES

- Aghababian, V., & Nazir, T. A. (2000). Developing normal reading skills : aspects of the visual processes underlying word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology, 76*, 123-150.
- Blazely, A. M., Coltheart, M., & Casey, B. J. (2005). Semantic impairment with and without surface dyslexia : Implications for models of reading. *Cognitive Neuropsychology, 22*, 695-717.
- Brem, S., Lang-Dullenkopf, A., Maurer, U., Halder, P., Bucher, K., & Brandeis, D. (2005). Neurophysiological signs of rapidly emerging visual expertise for symbol strings. *Cognitive Neuroscience, 16*, 45-48.
- Cohen, L. et al. (2003). Visual word recognition in the left and right hemispheres : Anatomical and functional correlates of peripheral alexias. *Cerebral Cortex, 13*, 1313-1333.
- 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.

- Coltheart, M., & Rastle, K. (1994). Serial processing in reading aloud: Evidence for dual-route models of reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *20*, 1197-1211.
- Cumming, T. B., Patterson, K., Verfaellie, M., & Graham, K. S. (sous presse). One bird with two stones: Abnormal word length effects in pure alexia and semantic dementia. *Cognitive Neuropsychology*.
- Fiset, D., Arguin, M., & McCabe, E. (2006). The breakdown of parallel letter processing in letter-by-letter dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, *23*, 240-260.
- Gauthier, I., Wong, A. C-N., Hayward, W. G., & Cheung, O. S. (2006). Font tuning associated with expertise in letter perception. *Perception*, *35*, 541-559.
- Geisler, W. & Murray, R. (2003). Practice doesn't make perfect. *Nature*, *423*, 696-697.
- Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2001). Bubbles: A technique to reveal the use of information in recognition. *Vision Research*, *41*, 2261-2271.
- Harm, M., & Seidenberg, M. S. (2001). Are there orthographic impairments in phonological dyslexia? *Cognitive Neuropsychology*, *18*, 71-92.

- Harm, M., & Seidenberg, M. S. (2004). Computing the meanings of words in reading: Cooperative division of labor between visual and phonological processes. *Psychological Review, 111*, 662-720.
- Hinton, G. E., Shallice, T. (1991). Lesioning an attractor network: investigation of acquired dyslexia. *Psychological Review, 98*, 74-95.
- Hodges, J. R., Patterson, K., Oxbury, S., & Funnell, E. (1992). Progressive fluent aphasia with temporal lobe atrophy. *Brain, 115*, 1783-1806.
- 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.
- 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.
- Lamberts, K. (2005). Interpretation of orthographic uniqueness point effects in visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, 31*, 14-19.
- Marcel, A. J. (1983). Conscious and unconscious perception: Experiments on visual masking and word recognition. *Cognitive Psychology, 15*, 197-237.

- McCandliss, B. D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Sciences*, 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.
- McConkie, G. W., Zola, D., Grimes, J., Kerr, P.W., Bryant, N. R., & Wolff, P. M. (1991). Children's eye movements during reading. In J. F. Stein (Ed.), *Vision and visual dyslexia* (pp. 251-262). London: Macmillan.
- Pashler, H. (1998). *The psychology of attention*. Cambridge: MIT press.
- Pelli, D. G., Burns, C. W., Farell, B., & Moore-Page, D. C. (sous presse). Feature detection and letter identification. *Vision Research*.
- Pelli, D. G., Farell, B., & Moore, D. C. (2003). The remarkable inefficiency of word recognition. *Nature*, 423, 752-756.
- Perrett, D. I., Oram, M. W., & Ashbridge, E. (1998). Evidence accumulation in cell populations responsive to faces: An account of generalisation of recognition without mental transformations. *Cognition*, 67, 111-145.

- Plaut, D. C. (1999). A connectionist approach to word reading and acquired dyslexia: Extension to sequential processing. *Cognitive Science*, *23*, 543-568.
- Plaut, D. C., & Booth, J. R. (2000). Individual and developmental differences in semantic priming: empirical and computational support for a single-mechanism account of lexical processing. *Psychological Review*, *107*, 786-823.
- Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. E. (1996). Understanding normal and impaired word reading: Computational principles in quasi-regular domains. *Psychological Review*, *103*, 56-115.
- Rayner, K. (1986). Eye movements and the perceptual span in beginning and skilled readers. *Journal of Experimental Child Psychology*, *41*, 211-236.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, *124*, 372-422.
- Reicher, G. M. (1969). Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, *81*, 275-280.

Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1982). An interactive activation model of context effects in letter perception: Part 2. The contextual enhancement effect and some tests and extensions of the model. *Psychological Review*, 89, 60-94.

Sanocki, T. (1987). Visual knowledge underlying letter perception: font specific, schematic tuning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 13, 267-278.

Sanocki, T. (1988). Font regularity constraints on the process of letter recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 14, 472-480.

Segui, J., & Grainger, J. (1990). Priming word recognition with orthographic neighbors: Effects of relative prime-target frequency. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 65-76.

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

Townsend, J. T. (1990). SERIAL VS. PARALLEL PROCESSING: Sometimes they look like tweedledeum and tweedledee but they can (and should) be distinguished. *Psychological Science*, 1, 46-54.

- Travers, J.R. (1973). The effect of forced serial processing on identification of words and random letter strings, *Cognitive Psychology*, 5, 109-137.
- Travers, J.R. (1974). Word recognition with forced serial processing : Effects of segment size and temporal order variation. *Perception & Psychophysics*, 16, 35-42.
- Travers, J.R. (1975). Forced serial processing of words and letter strings: A reexamination. *Perception & Psychophysics*, 18, 447-452.
- Vinette, C., Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2004). Spatio-temporal dynamics of face recognition in a flash: It's in the eyes! *Cognitive Science*, 28, 289-301.
- Weekes, B. S. (1997). Differential effects of number of letters on word and nonword naming latency. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 50A, 439-456.
- Whitney, C. (2001). How the brain encodes the order of letters in a printed word : The SERIOL model and selective literature review. *Psychonomic Bulletin and Review*, 8, 221-243.