

Université de Montréal

**Latéralisation hémisphérique et lecture :
l'utilisation de l'information visuelle disponible en
reconnaissance de mots par chaque hémisphère cérébral**

par

Karine Tadros

Département de psychologie

Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des arts et des sciences
en vue de l'obtention du grade de philosophiæ doctor (Ph. D.)
en psychologie
option neuropsychologie recherche et intervention

mai 2013

© Karine Tadros, 2013

Résumé

Dans le cadre de cette thèse, nous investiguons la capacité de chaque hémisphère cérébral à utiliser l'information visuelle disponible lors de la reconnaissance de mots. Il est généralement convenu que l'hémisphère gauche (HG) est mieux outillé pour la lecture que l'hémisphère droit (HD). De fait, les mécanismes visuoperceptifs utilisés en reconnaissance de mots se situent principalement dans l'HG (Cohen, Martinaud, Lemer et al., 2003). Puisque les lecteurs normaux utilisent optimalement des fréquences spatiales moyennes (environ 2,5 - 3 cycles par degré d'angle visuel) pour reconnaître les lettres, il est possible que l'HG les traite mieux que l'HD (Fiset, Gosselin, Blais et Arguin, 2006). Par ailleurs, les études portant sur la latéralisation hémisphérique utilisent habituellement un paradigme de présentation en périphérie visuelle. Il a été proposé que l'effet de l'excentricité visuelle sur la reconnaissance de mots soit inégal entre les hémichamps. Notamment, la première lettre est celle qui porte habituellement le plus d'information pour l'identification d'un mot. C'est aussi la plus excentrique lorsque le mot est présenté à l'hémichamp visuel gauche (HVG), ce qui peut nuire à son identification indépendamment des capacités de lecture de l'HD. L'objectif de la première étude est de déterminer le spectre de fréquences spatiales utilisé par l'HG et l'HD en reconnaissance de mots. Celui de la deuxième étude est d'explorer les biais créés par l'excentricité et la valeur informative des lettres lors de présentation en champs divisés. Premièrement, nous découvrons que le spectre de fréquences spatiales utilisé par les deux hémisphères en reconnaissance de mots est globalement similaire, même si l'HG requière moins d'information visuelle que l'HD pour atteindre le même niveau de performance. Étonnamment toutefois, l'HD utilise de plus hautes fréquences spatiales pour identifier des mots plus longs. Deuxièmement, lors de présentation à l'HVG, nous trouvons que la 1^{re} lettre, c'est à dire la plus excentrique, est parmi les mieux identifiées même lorsqu'elle a une plus grande valeur informative. Ceci est à l'encontre de l'hypothèse voulant que l'excentricité

des lettres exerce un biais négatif pour les mots présentés à l'HVG. De façon intéressante, nos résultats suggèrent la présence d'une stratégie de traitement spécifique au lexique.

Mots-clés : lecture, reconnaissance de mots, fréquences spatiales, valeur informative, excentricité visuelle, latéralisation hémisphérique, spécialisation hémisphérique, traitement lexical.

Abstract

In this thesis, we investigate the cerebral hemispheres' ability to use the available visual information for word recognition in lateral periphery. It is generally acknowledged that the left hemisphere (LH) is more able at reading than the right (RH). Accordingly, the visuoperceptual mechanisms of the brain for word recognition are primarily localized in the LH (Cohen, Martinaud, Lemer et al., 2003). As normal readers use medium spatial frequencies (about 2,5 – 3 cycles per degree of visual angle) to recognize words, it is possible that the LH is better tuned for processing these spatial frequencies than the RH (Fiset, Gosselin, Blais et Arguin, 2006). Furthermore, studies concerned with reading abilities in the cerebral hemispheres commonly present words in visual periphery. However, the effect of visual eccentricity on word recognition is thought to be unequal between hemifields, notably because the first letter in a word usually carries the most information for its accurate identification. It is also the most eccentric letter when a word is presented in the LVF, which may cause a negative bias for the identification of words presented to the LVF regardless of the actual reading capacities of the RH. The main objective of the first study is to determine the spatial frequency tuning functions of the LH and RH for word recognition. The goal of our second study is to explore letter identification biases for words presented to the left and right visual fields as a function of eccentricity by varying the information value of letter positions. Firstly, we discover that the spatial frequency tuning of both hemispheres is globally similar, even though the LH requires less visual information than the RH to reach the same level of performance. Surprisingly however, the RH requires higher spatial frequencies to identify longer words. Secondly, we find that for LVF displays, the first letter, i.e. the most eccentric, is among the most accurately identified, even when it has a greater information value. This argues against the hypothesis that letter eccentricity exerts a negative bias for words presented to the LVF. Interestingly, our findings also suggest a lexical-specific processing strategy.

Keywords: reading, word recognition, spatial frequencies, information value, visual eccentricity, hemispheric lateralization, hemispheric specialization, lexical processing.

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract	iv
Liste des figures	ix
Liste des sigles	x
Français.....	x
Anglais.....	x
Remerciements.....	xii
1 Introduction générale	1
1.1 Le traitement des fréquences spatiales par le système visuel et lors de la lecture	2
1.1.1 La perception des fréquences spatiales.....	2
1.1.2 Le traitement des fréquences spatiales lors de la lecture.....	4
1.2 Biais hémisphériques lors du traitement des fréquences spatiales.....	6
1.3 Étude des capacités de lecture en présentation de mots latéralisés dans les champs visuels	8
1.3.1 Influence de l'empan et de l'encombrement visuels	10
1.3.2 Influence de la stratégie de lecture des mots	10
1.3.3 Influence du balayage attentionnel	11
1.3.4 Influence de la valeur informative des positions de lettres dans le mot ..	12
1.4 Présentation des études	15
1.4.1 Première étude : l'utilisation des fréquences spatiales par chaque hémisphère cérébral lors de la lecture de mots.....	15
1.4.2 Deuxième étude : l'impact de l'excentricité et de la valeur informative des différentes positions de lettres sur les capacités d'identification pour chaque hémichamp visuel.....	16
2 Première étude	18
2.1 Abstract	20

2.2	Introduction.....	21
2.3	Methods	27
2.3.1	Participants	27
2.3.2	Material and Stimuli	27
2.3.3	Procedure	31
2.4	Results.....	33
2.5	Discussion	38
2.6	Acknowledgements	42
2.7	References.....	43
3	Deuxième étude	51
3.1	Abstract	53
3.2	Introduction.....	54
3.3	Methods	58
3.3.1	Participants	58
3.3.2	Material and Stimuli	58
3.3.3	Procedure	61
3.4	Results.....	64
3.5	Discussion	69
3.6	Acknowledgements	74
3.7	References.....	75
4	Discussion	78
4.1	Sommaire des résultats.....	78
4.1.1	Résultats principaux et conclusion, étude 1 : Les fréquences spatiales utilisées de façon optimale pour la lecture par chaque hémisphère cérébral.....	78
4.1.2	Résultats principaux et conclusion, étude 2 : L’impact de la valeur informatrice des lettres de mots sur les capacités d’identification de l’observateur dans chaque hémichamp visuel	79
4.2	Mise en relation des résultats des deux études et implications théoriques	81

4.2.1	Impact de la valeur informative et de l'excentricité des lettres lors d'échantillonnage fréquentiel de mots présentés en champs divisés.....	82
4.2.2	Utilisation d'une stratégie compensatoire lors de l'identification de mots.....	84
4.2.3	Impact de l'encombrement visuel lors de présentation en champs divisés.....	84
4.2.4	Déploiement d'une fenêtre attentionnelle et une stratégie de traitement spécifique à l'identification des mots	86
4.3	Fréquences spatiales, spécialisation cérébrale et dyslexie.....	87
4.3.1	Fréquences spatiales et spécialisation cérébrale	87
4.3.2	Fréquences spatiales et dyslexie	89
5	Conclusion	91

Liste des figures

Figure 1. Examples of filtered word images that were submitted to a random spatial frequency sampling using the Bubbles method. During the experimental task, the quantity of information revealed (i.e. the number of bubbles) varied according to the participant's response accuracy.	29
Figure 2. Diagnosticity of spatial frequencies for word recognition with stimuli presented to the two hemispheres.	34
Figure 3. Illustration of the most (left) and least (right) used spatial frequencies for accurate word recognition with stimuli presented to the (a) left and (b) right visual hemifields by filtering the word 'vision'.	36
Figure 4. Diagnosticity of spatial frequencies for word recognition as a function of hemisphere and word length.	37
Figure 5. Mean accuracy identification rates for the five letter positions within the pseudoword for the ABC-BI condition, the BI-ABC condition, as well as the visual span for the LVF and the RVF.	65

Liste des sigles

Français

HD : hémisphère droit

HG : hémisphère gauche

HVD : hémichamp visuel droit

HVG : hémichamp visuel gauche

IRMf : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

LPL : lettre-par-lettre

Anglais

ASFM : area spatial frequency measure

CVC : consonant-vowel-consonant

EEG : electroencephalography

FWHM : full width at half maximum

LH : left hemisphere

LVF : left visual field

M : mean

RH : right hemisphere

RVF : right visual field

SD : standard deviation

SF : spatial frequency

TMS : transcortical magnetic stimulation

VCV : vowel-consonant-vowel

*À Jackson, Michael, Pepé le Pew, Zandar,
celui qui plonge et celui avec la lanterne.*

Remerciements

D'abord, j'aimerais remercier mes directeurs. Frédéric, merci pour l'enseignement et le défi. Avec tes points de vue inhabituels et parfois choquants, tu m'as appris à remettre en question les balises avec lesquelles j'aborde la science. Pendant presque huit ans, tu m'as dirigé à ta façon, en encourageant mon autonomie mais aussi en me soutenant lorsque c'était important. M. Arguin, votre fiabilité et efficacité m'ont été précieuses dans ce parcours tumultueux. Daniel, mentor depuis le premier jour, cette thèse n'aurait jamais été possible sans toi. Ta passion contagieuse pour la recherche et tes talents de pédagogue ont fait de toi un guide extraordinaire.

Un gros merci à mes amis du laboratoire. Quelques particuliers : Catherine – qu'est-ce qu'on en a parcouru ensemble depuis le bacc! Je suis choyée d'avoir pu partager tous les hauts et les bas de cette « expérience » de laboratoire avec toi. Nicolas, c'est d'abord et avant tout nos pauses café accompagnées de longues réflexions sur la vie, le bonheur et l'amour qui vont me manquer. Cynthia et Caroline, votre amitié et support ont été très appréciés durant ces belles années.

Je tiens également à remercier mes amis du programme de neuropsychologie. Particulièrement Judith, Lyssa, Rosemarie et Julie. De *si* belles amitiés sont nées au travers du partage de nos réussites et de nos frustrations académiques, mais surtout de notre détermination à profiter de la vie malgré nos horaires chargés. Patrice, pendant de nombreuses années tu as su m'encourager et me reconforter quand j'en avais besoin, je t'en serai toujours reconnaissante.

Merci à mes amis de longue date, qui ont réussi à leur insu à me rappeler que ma vie n'était pas définie par mon doctorat. Mention spéciale à Sabrina et Tanya, c'est en grande partie grâce à vous que j'ai su garder un équilibre dans mon quotidien. Vous êtes des étoiles, des amies précieuses et irremplaçables.

De loin les personnes envers qui je suis la plus reconnaissante sont les membres de ma famille, des piliers d'un support inébranlable. Mes parents, qui ont le cœur si grand. C'est à cause de votre exemple que je suis travaillante et déterminée, à

cause de vos valeurs que je donne de l'importance aux petits plaisirs de la vie. J'ai une chance incroyable de vous avoir comme modèles. Ma sœur, si différente de moi mais semblable en même temps, avec qui je peux partager sans gêne mes joies et mes tristesses dans notre français haute-vitesse. Mes tétas, tantes, oncles et cousins, dont les petites attentions me font tant de bien. Je vous aime.

1 Introduction générale

Il est bien connu qu'en reconnaissance de mots écrits, l'hémisphère gauche est meilleur que le droit (chez des personnes droitères; par exemple, Lavidor et Ellis, 2002, ont montré que des lecteurs normaux ne montrent pas d'effet de longueur de mots pour des mots présentés dans le champ visuel droit, mais en montrent pour des mots présentés dans le champ visuel gauche). Or, le traitement orthographique lors de reconnaissance de mots implique à la fois la vision (pour la perception de la forme) et le langage (pour la phonologie et la sémantique). Le cerveau humain doit d'abord traiter l'information visuo-orthographique présente dans les mots afin de les reconnaître pour ensuite utiliser ses habiletés linguistiques et comprendre ce qui est lu. Toutefois, plusieurs propriétés visuelles de bas niveau peuvent influencer les habiletés de lecture d'une personne. De plus, les habiletés de traitement de l'information visuelle peuvent varier d'un hémisphère cérébral à l'autre, affectant ainsi les habiletés de lecture. Donc il est possible que cette différence entre les capacités de lecture des hémisphères soit causée non seulement par un meilleur accès au contenu langagier (les habiletés de langage oral se situant dans l'hémisphère gauche), mais aussi par de meilleures capacités à traiter l'information visuelle utile à la reconnaissance de mots.

Dans le cadre de cette thèse, il est question du traitement de l'information visuelle par les hémisphères cérébraux lors de la reconnaissance de mots ou des lettres qui les constituent. Cette dissertation est composée de deux articles empiriques. Le premier vise à investiguer l'utilisation des fréquences spatiales par chaque hémisphère cérébral lors de l'identification de mots à l'aide de la méthode des bulles (Gosselin et Schyns, 2001). Le deuxième explore l'impact de l'excentricité visuelle des lettres du mot, de la valeur informative de ces lettres ainsi que de l'interaction entre les deux sur les capacités d'identification de

l'observateur lors de présentation en champs visuels divisés (c'est à dire à l'hémichamp gauche ou droit).

Les articles sont avant tout mis en contexte dans l'introduction qui suit à l'aide d'un court survol des connaissances actuelles dans le domaine. Il sera d'abord question des fréquences spatiales ainsi que de leur traitement par le système visuel, de façon générale ainsi que lors de la lecture. Ensuite, les biais hémisphériques connus pour le traitement des fréquences spatiales seront discutés, encore une fois de façon générale et lors de la lecture. Suivra une recension des écrits au sujet des capacités de lecture lors de présentation en champs divisés, et de l'impact de facteurs autres que la capacité de traitement des hémisphères cérébraux sur les habiletés de lecture. Enfin, les objectifs et hypothèses des deux études qui constituent la thèse sont présentés.

1.1 Le traitement des fréquences spatiales par le système visuel et lors de la lecture

1.1.1 La perception des fréquences spatiales

La capacité de notre système visuel à percevoir des stimuli correctement dépend de plusieurs facteurs, dont la disponibilité de l'information ainsi que la capacité et la sensibilité de notre système à l'utiliser. Entrent en jeu à la fois des propriétés de bas niveau, tel que l'acuité visuelle et la courbe de sensibilité au contraste (décrite ci-dessous; pour des exemples de facteurs de bas niveau influençant les habiletés de lecture, voir Howell et Kraft, 1960; Van Nes et Jacobs, 1981; Legge, Rubin, et Luebker, 1987; Fiset, Gosselin, Blais, et Arguin, 2006; Fiset, Arguin et Fiset, 2006) ainsi que des propriétés de plus haut niveau,

notamment les processus attentionnels spécifiques à la tâche et les caractéristiques sémantiques propres à la nature du stimulus.

L'information visuelle que l'on perçoit se décompose par la transformation de Fourier en une somme de grilles sinusoïdales. Ces grilles sinusoïdales ont quatre propriétés : une fréquence spatiale, une phase, une orientation et un contraste. La fréquence spatiale est la propriété sur laquelle nous nous concentrerons dans cette thèse. Elle est une mesure de la fréquence à laquelle les composantes sinusoïdales du stimulus visuel se répètent par unité de distance. Il est important de clarifier la distinction entre les fréquences spatiales de l'objet et les fréquences spatiales sur la rétine. Essentiellement, c'est la dimension de l'espace par rapport à laquelle les changements de luminance sont comparés qui varie d'une mesure à l'autre. La fréquence spatiale de l'objet se définit en fonction de l'étendue de l'objet, donc en termes de cycles par objet. La fréquence rétinienne, pour sa part, se définit en termes de l'étendue rétinienne, soit en cycles par degré d'angle visuel. Cette dernière est manipulée en variant la distance de visionnement ou la taille de l'image sur la rétine. Ainsi, la fréquence spatiale de l'objet est une fréquence spatiale relative aux proportions de l'objet et invariable à sa taille, tandis que la fréquence spatiale rétinienne est une mesure absolue des fréquences spatiales et est fonction conjointement de la fréquence spatiale de l'objet et de sa distance de visionnement.

Différentes fréquences spatiales d'une image visuelle sont associées à différentes composantes de cette image. Les plus basses fréquences spatiales permettent de la percevoir de façon globale et de se faire une idée grossière de sa forme et de l'agencement de ses composantes. Elles ne permettent habituellement pas une discrimination fine des traits qui la composent. En revanche, les plus hautes fréquences spatiales permettent une discrimination fine des détails

constituant une image mais ne permettent pas une perception de sa forme globale ni de l'agencement de ses différentes parties.

La sensibilité du système visuel humain aux différentes fréquences spatiales varie d'un individu à l'autre mais atteint son sommet à approximativement 7 cycles par degré d'angle visuel avec un éclairage normal (Watson, Barlow et Robson 1983 ; voir toutefois Patching et Jordan, 2005, qui rapportent des sommets entre 2 et 6 cycles par degré d'angle visuel). Un plus haut contraste visuel est nécessaire pour la perception de fréquences spatiales plus hautes et plus basses que cette étendue. Le niveau de contraste nécessaire pour la perception des fréquences spatiales auxquelles le système visuel humain est sensible constitue la courbe de sensibilité au contraste de l'observateur (Campbell et Green, 1965). Ainsi, notre capacité à percevoir un stimulus dépend à la fois des fréquences spatiales présentes dans le stimulus et de la sensibilité de notre système visuel à ces fréquences.

1.1.2 Le traitement des fréquences spatiales lors de la lecture

Chung, Legge et Tjan (2002) soutiennent que les fréquences spatiales qui sont utilisées de façon optimale pour l'identification de lettres par des observateurs normaux sont celles qui offrent le meilleur équilibre entre la possibilité de discrimination de la lettre et l'accessibilité à l'information selon la courbe de sensibilité au contraste. Plusieurs études ont montré l'importance d'une bonne sensibilité aux fréquences spatiales optimales pour la lecture (voir par exemple Borsting, Ridder, Dudeck et al, 1996; Cornelissen, 1993; Demb, Boynton, Best et Heeger, 1998; Evans, Drasdo et Richards, 1993 et 1996; Lovegrove, Bowling, Badcock et Blackwood, 1980; Lovegrove, Martin, Bowling, Blackwood, Badcock et Paxton, 1982). Patching et Jordan (2005) ont récemment comparé la courbe de

sensibilité au contraste de lecteurs rapides et de lecteurs lents. Ils ont trouvé que les lecteurs lents étaient moins sensibles aux fréquences de 2, 4 et 6 cycles par degré d'angle visuel que les lecteurs rapides. De façon concordante, il a été montré que la reconnaissance normale des lettres, seules ou dans des séquences formant des mots, emploie de façon idéale une étendue de fréquences spatiales moyennes ayant un sommet à environ 2,5-3 cycles par lettre (pour des lettres de 1 degré d'angle visuel; Fiset, Gosselin, Blais et Arguin, 2006; Solomon et Pelli, 1994).

Par ailleurs, il est important de souligner la différence entre la sensibilité aux fréquences spatiales de l'objet (relatée en cycles par lettre) et la sensibilité aux fréquences spatiales absolues (en cycles par degré d'angle visuel) lors de la lecture. Bien que Solomon et Pelli (1994) aient d'abord rapporté que le mécanisme de reconnaissance de lettres semblait être échelonné approximativement en fonction de la taille (c'est à dire en cycles par lettre indépendamment de la taille de la lettre), des études plus récentes ont montré que les fréquences spatiales les plus utiles n'y étaient pas tout à fait invariantes (Chung, Legge et Tjan, 2002 ; Majaj, Pelli, Kurshan et Palomares, 2002). Majaj et ses collaborateurs (2002) ont utilisé plusieurs polices et tailles de lettres différentes et ont trouvé que le sommet de la bande de fréquences la plus utile pour la reconnaissance de lettres variait en fonction de la fréquence des traits de la lettre (stroke frequency; c'est à dire le nombre moyen de lignes par tranche de lettre divisé par la largeur de la lettre), en suivant une pente log-log de $2/3$. Ils en concluent que les grosses lettres sont reconnues davantage par leurs rebords (de plus hautes fréquences) tandis que les petites lettres sont reconnues davantage par leurs traits grossiers (de plus basses fréquences). Une différence quantitative et qualitative dans le traitement des lettres relativement à leur taille est ainsi observée.

1.2 Biais hémisphériques lors du traitement des fréquences spatiales

Des différences quantitatives et qualitatives dans le traitement des fréquences spatiales ont également été observées entre les hémisphères cérébraux, l'hémisphère gauche favorisant de façon générale les hautes et les moyennes fréquences spatiales et l'hémisphère droit les basses fréquences spatiales (Christman, Kitterle et Niebauer, 1997 ; Ivry et Robertson, 1998; Sergent, 1983).

Martin (1979) est un des premiers à avoir trouvé un biais hémisphérique clair pour le traitement des fréquences spatiales qualitatives (ou relatives) dans le système visuel. Ces fréquences spatiales se définissent en fonction des autres fréquences spatiales présentes dans le stimulus et peuvent dépendre de la tâche demandée. Référence leur est souvent faite en termes de composantes 'locales' – les fréquences relativement hautes – et 'globales' – les fréquences relativement basses. Martin a d'abord présenté des lettres hiérarchiques de Navon, soient de grosses lettres composées par l'alignement de plus petites lettres (par exemple, une grande lettre 'C' composée visuellement de plus petites lettres 'A' : la grande lettre correspond aux fréquences spatiales relativement basses tandis que les petites lettres correspondent aux fréquences spatiales relativement hautes) à des observateurs normaux. Il a trouvé que les fréquences spatiales relativement hautes étaient traitées plus rapidement lorsqu'elles étaient présentées à l'hémisphère gauche que lorsqu'elles étaient présentées au droit. Inversement, le traitement de fréquences spatiales relativement basses menait à des réponses plus rapides lorsqu'elles étaient présentées à l'hémisphère droit. Sergent (1982) en est arrivée à la même conclusion avec une tâche similaire.

Plus récemment, Yamaguchi, Yamagata et Kobayashi (2000) ont investigué les corrélats neuronaux associés au traitement des fréquences spatiales

relativement hautes et relativement basses des lettres hiérarchiques de Navon à l'aide de potentiels évoqués. Ils ont trouvé que la région temporo-pariétale droite était davantage activée lorsque les participants portaient attention à la composante globale du stimulus, et la région temporelle postérieure gauche était davantage activée lorsqu'ils déployaient leur attention sur la composante locale du stimulus. De façon encore plus poussée, Weissman et Woldorff (2005) ont récemment établi une dissociation entre les régions cérébrales et les biais hémisphériques pour différents types de déploiement attentionnel à l'aide des lettres hiérarchiques et de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Ils ont trouvé que l'attribution de l'attention vers les propriétés locales ou globales d'un stimulus avant son apparition était associée à des différences hémisphériques spécifiquement dans le sillon intrapariétal, le gauche étant plus activé par les composantes locales que globales mais pas le droit. L'attribution de l'attention vers les propriétés locales ou globales d'un stimulus après son apparition était pour sa part associée à des différences d'activation dans le lobe pariétal inférieur et le gyrus temporal supérieur, ceux dans l'hémisphère gauche étant encore une fois plus activés pour les composantes locales que globales.

D'autres études ont visé à investiguer la portée de ces biais hémisphériques pour les fréquences spatiales relatives en liant directement les patrons de lettres hiérarchiques à leur contenu en termes de fréquences spatiales absolues, soit en réduisant le contenu en basses fréquences spatiales (Hughes, Fendrich, et Reuter-Lorenz, 1990; Lamb et Yund, 1996; Robertson, 1996), ou à l'aide d'une procédure d'adaptation (avec des grilles sinusoïdales de hautes ou basses fréquences; Shulman, Sullivan, Gish et Sakoda, 1986). Les résultats de ces dernières ont montré que les avantages attribués aux fréquences spatiales relativement hautes ou basses contenues dans les lettres hiérarchiques pouvaient être contrecarrées par ces altérations des fréquences absolues.

L'utilisation des fréquences spatiales absolues par les hémisphères cérébraux a été investiguée à l'aide d'une approche « spectralement pure », c'est-à-dire avec des grilles sinusoïdales. Plusieurs études n'ont pas montré de différence interhémisphérique lors de la détection des hautes et des basses fréquences spatiales (e.g., Blake et Mills, 1979; Fiorentini et Berardi, 1984; Kitterle et Kaye, 1985; Rao, Rourke et Whitman, 1981; Kitterle, Christman et Hellige, 1990). Cependant, Kitterle, Christman et Hellige (1990) ont démontré que, malgré l'absence de biais hémisphérique pour le traitement de bas niveau des fréquences spatiales (tel que reflété par une tâche de détection), une asymétrie hémisphérique était retrouvée lorsqu'on demandait aux observateurs d'identifier le contenu fréquentiel des grilles sinusoïdales présentées. Néanmoins, des biais dans le traitement des fréquences spatiales absolues ne sont pas retrouvés de façon constante dans les hémisphères cérébraux (voir par exemple Chiarello, Senehi et Soulier, 1986; Fendrich et Gazzaniga, 1990; Hardyck, 1991; Peterzell, 1991). Ainsi, bien que nous sachions qu'il existe des préférences hémisphériques pour le traitement des fréquences spatiales, celles qui sont privilégiées par les hémisphères droit et gauche pour la reconnaissance ainsi que le(s) niveau(x) de traitement auquel(s) ces biais ont lieu demeurent à être précisés.

1.3 Étude des capacités de lecture en présentation de mots latéralisés dans les champs visuels

Une méthode largement utilisée pour mesurer la capacité des différents hémisphères à traiter l'information visuelle est celle de la présentation en champs divisés. Cette méthode consiste à présenter le stimulus dans un hémichamp visuel uniquement, à gauche ou à droite d'un point de fixation central. Les mots présentés à l'hémichamp visuel gauche sont donc initialement traités par

l'hémisphère droit, tandis que ceux présentés à l'hémichamp visuel droit sont d'abord traités par l'hémisphère gauche.

Lors de la présentation de mots en champs divisés, la lecture est effectuée de façon plus efficace par l'hémisphère gauche que par le droit à la fois en ce qui concerne le temps et la justesse de la lecture (voir par exemple Bradshaw et Nettleton, 1983, Chiarello, 1988 ou encore Hellige, 1993 pour une recension des écrits au sujet de la reconnaissance de mots en présentation latéralisée). Il est généralement convenu que les résultats de telles études reflètent la spécialisation hémisphérique pour le traitement du stimulus présenté. Cependant, cette supposition a été remise en question à maintes reprises (voir par exemple Heron, 1957; Kirsner et Schwartz, 1986; Bryden, 1986; Efron, Yund et Nichols, 1987; Efron, 1990; Bryden, Mondor, Loken, Ingleton, et Bergstrom, 1990; Brysbaert, Vitu et Schroyens, 1996). De fait, de nombreux facteurs autres que ceux découlant de la nature du stimulus peuvent influencer la performance des participants lors de ce type de présentation. Efron (1990) souligne par exemple l'impact des stratégies de traitement de l'information, des caractéristiques propres aux participants, et des méthodes utilisées pour mesurer la performance. Peuvent aussi entrer en jeu des limites perceptives de bas niveau, telles qu'une diminution de l'acuité visuelle (qui affecte les hémichamps à peu près également) ou une augmentation de la sensibilité à l'encombrement visuel (qui affecte probablement l'hémichamp gauche plus que le droit—voir la section suivante) avec l'augmentation de l'excentricité visuelle du stimulus présenté aux hémichamps. Ces limites visuelles sont susceptibles de nuire aux habiletés de lecture des hémisphères cérébraux lors de présentation en champs divisés, par exemple en minant la vitesse de lecture (Legge, Cheung, Yu, Chung, Lee et Owens, 2007).

1.3.1 Influence de l'empan et de l'encombrement visuels

La capacité d'un observateur à identifier une lettre en périphérie visuelle est moindre si elle est entourée d'autres lettres que si elle est présentée de façon isolée. Cette difficulté est l'expression d'un phénomène nommé encombrement visuel (*visual crowding*), une incapacité à identifier un objet auparavant parfaitement identifiable lorsqu'il est entouré de façon rapprochée par d'autres objets (voir Levi, 2008 pour une recension récente des écrits sur le sujet). Lors de la lecture, plus la lettre s'éloigne en périphérie visuelle, plus son acuité diminue et plus l'impact de l'encombrement visuel est grand sur les capacités d'identification de l'observateur. Ainsi, l'excentricité rétinienne horizontale jusqu'à laquelle un observateur peut correctement identifier une lettre d'une taille donnée, c'est à dire son empan visuel (*visual span*; O'Regan, 1990), est en grande partie déterminée par l'encombrement visuel. Il peut varier d'un individu à l'autre mais est généralement plus grand dans l'hémichamp visuel droit que dans l'hémichamp visuel gauche lors de la lecture (McConkie et Rayner, 1976; Underwood et McConkie, 1985). De plus, le fait que l'empan est plus grand à droite qu'à gauche suggère que le crowding est supérieur à gauche qu'à droite. Ces facteurs viennent ainsi poser une limite supplémentaire aux capacités des lecteurs à reconnaître correctement les mots lors de présentation en champs divisés, et ce de façon inégale entre les hémichamps visuels (nuisant davantage à l'hémichamp visuel droit qu'au gauche) et indépendamment des réelles capacités de reconnaissance de mots des hémisphères cérébraux.

1.3.2 Influence de la stratégie de lecture des mots

Il est possible qu'un facteur propre à la nature des mots, soit la façon dont on les lit, ait un impact différent sur les performances dépendamment de

l'hémichamp auquel les stimuli sont présentés. Dans le cas des mots, créés de sorte à être lus de gauche à droite (Kirsner et Schwartz, 1986; Brysbaert, Vitu et Schroyens, 1996), la distance à parcourir sur le plan attentionnel à partir du point de fixation central avant de pouvoir commencer à lire le mot est différente entre les hémichamps. De fait, lorsque les mots sont présentés à l'hémichamp droit, le début du mot se situe près du point de fixation central, tandis que lorsqu'il est présenté à l'hémichamp visuel gauche il se situe en excentricité. Cette distance additionnelle à parcourir avant de commencer à lire le mot pourrait désavantager l'hémichamp visuel gauche dans ce type de paradigme, puisque la durée de présentation du stimulus est habituellement courte. Plusieurs chercheurs ont investigué cette hypothèse en utilisant des langues lues de droite à gauche. Ils postulent que si ce facteur avait un impact significatif sur la capacité de reconnaissance de mots entre les hémichamps, cet effet serait inversé lors de la lecture de langues telles que l'arabe, l'hébreu ou le farsi, qui se lisent de droite à gauche. Toutefois, la plupart d'entre eux n'ont pas trouvé un tel renversement, mais observent plutôt un maintien de l'avantage pour la lecture de mots présentés à l'hémichamp visuel droit (Orbach, 1967; Carmon, Nachson et Starinsky, 1976; Faust, Kravetz et Babkoff, 1993; voir cependant Melamed et Zaidel, 1993 qui ne trouvent aucune asymétrie hémisphérique chez des lecteurs de farsi). Ainsi, le patron de lecture de gauche à droite ne semble pas jouer un rôle décisif dans la meilleure performance pour les mots présentés à l'hémichamp visuel droit.

1.3.3 Influence du balayage attentionnel

Des facteurs attentionnels pourraient également affecter la performance des lecteurs selon l'hémichamp stimulé. De fait, il a été proposé que le balayage attentionnel s'effectue de façon prédéterminée lors de la lecture, un hémichamp visuel à la fois (Heron, 1957; Efron, Yund et Nichols, 1987). Efron, Yund et

Nichols (1987) ont demandé à des participants d'identifier une série de six patrons d'images présentée pour une très courte période de temps à gauche ou à droite d'un point de fixation central. En raison de la courte durée de présentation, c'est l'image rémanente qui est balayée dans les hémichamps. Celle-ci se détériore au fil du temps et il devient alors plus difficile d'identifier les images des séries. En se basant sur les patrons de réponses de leurs participants, Efron et ses collaborateurs concluent que le balayage a lieu dans l'hémichamp visuel droit en premier, de gauche à droite, puis dans l'hémichamp visuel gauche, encore une fois de gauche à droite. Récemment, Blais et al, 2009, ont également trouvé que la lecture de mots est effectuée de façon sérielle, et non de façon parallèle, tel que souvent proposé. Ainsi, il est possible qu'un facteur tel que celui de la détérioration de l'image rémanente lors du balayage attentionnel contribue à la diminution de la capacité des observateurs à correctement identifier les mots présentés à l'hémichamp visuel gauche dans ce type de paradigme expérimental.

1.3.4 Influence de la valeur informative des positions de lettres dans le mot

Enfin, il est possible qu'un facteur lexical bien important, la valeur informative des différentes positions de lettres d'un mot, ait un impact différent sur la capacité de reconnaissance des mots selon l'hémichamp (Kirsner et Schwartz, 1986). La valeur informative des lettres peut varier en fonction du lexique : dans une langue donnée, plus une position de lettre est en moyenne utile pour discriminer un mot des autres possibilités du lexique, plus sa valeur informative est élevée. Récemment, Blais et al (2009) ont déterminé que dans les langues française et anglaise, la position de lettre ayant la plus grande valeur informative dans un mot de 4 à 7 lettres est la première. Pour ce faire, ils ont

élaboré un lecteur idéal qui, pour chaque mot du lexique, effectue des cycles de traitement du mot une lettre à la fois dans le but de sélectionner la stratégie de lecture qui réduit le plus l'incertitude face à l'identité du mot en se fiant sur ses connaissances lexicales parfaites ainsi qu'en fonction des lettres déjà accumulées dans les cycles de traitement précédents. Ceci a résulté en une stratégie de lecture optimale pour chaque mot. La stratégie de lecture globalement optimale est la moyenne de toutes ces stratégies de lecture. Celle-ci nous indique la valeur informative moyenne de chaque position de lettre des mots du lexique qui lui a été présenté. Puisque la première lettre a une plus grande valeur informative, il est plus important d'identifier cette lettre que les autres lettres dans le mot pour pouvoir reconnaître le mot. Cependant, lors de présentation en champs divisés, la position de cette première lettre n'est pas équivalente entre les deux hémichamps. Dans l'hémichamp visuel droit, elle est la lettre la plus proche du point de fixation central, et profite d'une meilleure acuité visuelle (et donc d'un meilleur potentiel d'identification juste). Cependant, lors de présentation à l'hémichamp visuel gauche, la première lettre est la plus excentrique dans le mot et a une moins bonne acuité visuelle. Ainsi, il est possible que la position de la première lettre accorde un avantage considérable à l'hémichamp visuel droit pour l'identification juste des mots.

L'impact de la valeur informative des différentes positions de lettres d'un mot sur sa probabilité d'identification dans les hémichamps a été investiguée par différents chercheurs, par exemple en prenant des mots qui pouvaient être déterminés par leurs premières lettres et/ou par leurs dernières lettres, dans le but de voir si ce biais s'inverserait (Bryden, 1986; Bryden, Mondor, Loken, Ingleton, et Bergstrom, 1990). Ces chercheurs ne trouvent pas que la localisation de la valeur informative dans le mot influence la capacité d'identification du mot des lecteurs et concluent que la valeur informative n'affecte pas la supériorité du champ visuel droit. Toutefois, la portée de leurs résultats est limitée par deux

caractéristiques importantes de leurs études. Premièrement, ils considèrent le mot en tant que tout et n'évaluent pas l'effet de la valeur informative sur la capacité d'identification de chaque position de lettre dans le mot. De fait, la capacité à reconnaître les lettres à différentes positions dans le mot peut interagir avec la valeur informative de ces lettres et varier entre les hémichamps, particulièrement en fonction de l'excentricité de la position de lettre. Deuxièmement, ils utilisent des vrais mots originaires d'un vrai lexique dans lequel la valeur informative est en moyenne plus élevée pour les premières lettres (tels que les lexiques français, néerlandais et anglais; Brysbaert, Vitu et Schroyens, 1996; Bryden, Mondor, Loken, Ingleton, et Bergstrom, 1990). Les lecteurs auraient ainsi toujours été entraînés à lire les mots de ce lexique spécifique d'une certaine façon, et ce même si les lettres ayant la plus grande valeur informative dans les mots sélectionnés pour leur expérience étaient les dernières. Il est fort possible que les lecteurs n'aient pas changé de stratégie de lecture au courant de leur expérience pour avantager ces dernières lettres parce que c'est la meilleure façon, en moyenne, d'identifier les mots provenant de ce lexique. Dans le cadre de la présente thèse, nous étudierons de façon plus détaillée l'impact de la valeur informative des différentes positions de lettres dans les mots, puisque la valeur informative d'une position de lettre peut interagir avec son excentricité pour influencer la performance différemment, ce qui peut à son tour affecter la portée des résultats obtenus lors de l'étude des habiletés de lecture de mots par chaque hémisphère cérébral.

1.4 Présentation des études

1.4.1 Première étude : l'utilisation des fréquences spatiales par chaque hémisphère cérébral lors de la lecture de mots.

L'objectif de la première étude est de déterminer de façon précise le spectre de fréquences spatiales utilisé par chaque hémisphère cérébral lors de la reconnaissance de mots chez des lecteurs normaux. Les fréquences spatiales présentées dans les images de mots ont été échantillonnées à l'aide de la méthode des Bulles (Gosselin et Schyns, 2001), une méthode qui permet de révéler l'information diagnostique pour la perception efficace du stimulus présenté. Appliquée ici, elle consiste à révéler aléatoirement les fréquences spatiales des images de mots à chaque essai expérimental et, une fois l'expérience terminée, à effectuer une régression multiple linéaire sur les fréquences échantillonnées et l'exactitude des réponses des sujets (pour une description détaillée de cette version de la méthode des Bulles, voir Willenbockel et al., 2010). Le résultat de cette analyse est un ensemble de coefficients de régression qui indique l'importance relative des fréquences spatiales pour la reconnaissance de mots. Nous dériverons ainsi, pour chaque hémichamp visuel, le spectre de fréquences spatiales utilisé de façon optimale lors de l'identification de mots. Nous croyons que les mots présentés à l'hémichamp visuel gauche / hémisphère droit seront traités de façon moins efficace que ceux présentés à l'hémichamp visuel droit / hémisphère gauche et nous espérons observer une différence dans la sélection des fréquences spatiales utilisée de façon optimale par les hémisphères pour l'identification des mots présentés.

1.4.1.1 Apport des auteurs

L'apport de chaque auteur de la première étude est le suivant : j'ai contribué à la conception, la création, l'expérimentation et l'analyse des données et j'ai procédé à la rédaction de la majeure partie du manuscrit; Nicolas Dupuis-Roy s'est chargé en grande partie de la création de l'expérience ainsi que de l'analyse des données; Daniel Fiset a aidé à la conception de l'étude ainsi qu'à la rédaction du manuscrit; Martin Arguin a participé à la conception de l'étude et à la rédaction du manuscrit; Frédéric Gosselin a contribué à la conception de l'étude, l'analyse des données et la rédaction du manuscrit.

1.4.2 Deuxième étude : l'impact de l'excentricité et de la valeur informative des différentes positions de lettres sur les capacités d'identification pour chaque hémichamp visuel

La deuxième étude a pour but d'investiguer l'impact de la valeur informative des différentes positions de lettres ainsi que de l'excentricité visuelle sur les habiletés de lecture dans chaque hémichamp visuel. Pour ce faire, nous avons mesuré la capacité du lecteur à identifier les lettres de mots présentés à l'hémichamp visuel gauche ou droit, à l'aide de deux lexiques auparavant inconnus du lecteur, mais pour lesquels il connaît explicitement la distribution de la valeur informative des différentes positions de lettres. Il a ainsi la possibilité de développer une stratégie de lecture plus efficace en tenant compte de la valeur informative des lettres. Nous avons également mesuré l'empan visuel des lecteurs dans le but d'examiner l'interaction entre l'identification des différentes positions de lettres et l'excentricité visuelle dans chaque hémichamp visuel.

1.4.2.1 Apport des auteurs

L'apport de chaque auteur de la deuxième étude est le suivant : j'ai contribué à la conception de l'étude et j'ai procédé à la majeure partie de l'analyse des données ainsi que de la rédaction du manuscrit; Xavier Morin-Duchesne s'est chargé en grande partie de la création de l'expérience ainsi que de l'expérimentation et a contribué aux analyses; Daniel Fiset a aidé à la conception de l'étude; Martin Arguin a participé à la rédaction du manuscrit; Frédéric Gosselin a contribué à la conception de l'étude et à la rédaction du manuscrit.

2 Première étude

**Reading laterally: The cerebral hemispheric use of spatial
frequencies in visual word recognition**

Karine Tadros¹, Nicolas Dupuis-Roy¹, Daniel Fiset², Martin Arguin¹
& Frédéric Gosselin¹

¹Centre de Recherche en Neuropsychologie Expérimentale et Cognition,
Département de Psychologie, Université de Montréal.

²Département de Psychoéducation et de Psychologie, Université du Québec en
Outaouais.

2.1 Abstract

It is generally accepted that the left hemisphere (LH) is more capable for reading than the right hemisphere (RH). Left hemifield presentations (initially processed by the RH) lead to globally higher error rate, slower word identification as well as to a significantly stronger word length effect (i.e. slower reaction times for longer words). Because the visuo-perceptual mechanisms of the brain for word recognition are primarily localized in the LH (Cohen, Martinaud, Lemer et al., 2003), it is possible that this part of the brain possesses better spatial frequency (SF) tuning for processing the visual properties of words than the RH. The main objective of this study is to determine the spatial frequency tuning functions of the left and right hemispheres for word recognition. Each word image was randomly sampled in the SF domain using the SF Bubbles method (Willenbockel et al., 2010) and was presented laterally to the left or right visual hemifield. As expected, the LH requires less visual information than the RH to reach the same level of performance, illustrating the well-known LH advantage for word recognition. Globally, the SF tuning of both hemispheres is similar. However, these seemingly identical tuning functions hide important differences. Most importantly, we argue that the RH requires higher spatial frequencies to identify longer words because of crowding.

2.2 Introduction

In visual word recognition, lexical, phonological and semantic knowledge are used to make sense of what we are seeing. But before using such language skills, the human mind needs to extract the visuo-orthographic information in the stimuli (i.e. letters and words). It is well known that many low-level visual properties (e.g. contrast and spatial frequency content) influence the ease with which someone reads (see for example Howell and Kraft, 1960; Van Nes and Jacobs, 1981; Legge, Rubin, & Luebker, 1987; Fiset, Gosselin, Blais, & Arguin, 2006; Fiset, Arguin & Fiset, 2006). Different spatial frequencies are associated with different qualities of visual information. In visual word recognition for instance, lower spatial frequencies give access to coarse word shape but not to fine details, whereas higher spatial frequencies give access to fine letter traits, but not to coarser word shape. The visual system's ability to perceive different spatial frequencies varies according to a contrast sensitivity function (CSF; Campbell & Green, 1965). This function follows an inverted U-shape peaking at about 7 cycles per degree of visual angle. The optimal spatial frequencies for high-level visual categorization (i.e. face identification, word recognition, object categorization) are thought to be those presenting the best balance between the ideal spatial frequency information for target discrimination within a stimulus class and the human CSF (Chung, Legge & Tjan, 2002).

In the past two decades, work on the role of spatial frequencies in orthographic processing has focused primarily on letter identification (Alexander, Xie & Derlacki, 1994; Chung et al., 2002; Chung & Tjan, 2007; Majaj, Pelli, Kurshan & Palomares, 2002; Solomon & Pelli, 1994). These studies have shown that a relatively narrow band of spatial frequencies, between 1 and 3 cycles per

letter (depending on letter size, where readers shift towards higher spatial frequencies as letter size increases; Majaj et al, 2002), are most useful for letter identification. Researchers have also started to look into spatial frequency processing for word recognition (e.g. Legge, Pelli, Rubin, & Schleske, 1985; Chung & Tjan, 2009) and have found an optimal spatial frequency range quite similar to that of letter recognition.

It is commonly acknowledged that word recognition relies primarily on the left hemisphere (LH) for right-handed individuals. However, the right hemisphere (RH) may also contribute to reading as it is often reported to possess certain, albeit limited, reading skills (see, for example, Brooks, 1973; Bryden & Allard, 1976; Deason & Marsolek, 2005; Coslett & Monsul, 1994; Cohen et al, 2003; Gazzaniga, LeDoux & Wilson, 1977; Sidtis, Volpe, Wilson, Rayport & Gazzaniga, 1981; Marsolek, Kosslyn & Squire, 1992). For instance, normal readers have been found to present a RH advantage for the recognition of words that are hand-written or that are printed in novel or script-type fonts (versus a left-hemisphere advantage for words printed in standard print-type fonts; Brooks, 1973; Bryden & Allard, 1976; Deason & Marsolek, 2005). What's more, some individuals with brain lesions resulting in impaired reading have been found to rely on the RH for reading. In fact, Coslett and Monsul (1994) studied participants who had an acquired dyslexia following a brain lesion to the LH and further impeded their reading abilities when they applied transcortical magnetic stimulation (TMS) to inhibit their RH, but not when they applied it to inhibit the left. Accordingly, Cohen et al (2003) found, in readers with acquired letter-by-letter dyslexia, that the RH's fusiform gyrus assumed some of the functional properties normally specific to the LH fusiform gyrus, thus supporting the hypothesis that residual visuo-orthographic processes may take place in the RH. Moreover, the RH of some split-brain patients (i.e. patients who have undergone a corpus callosotomy) display a wide range of linguistic capacities, ranging from simple semantic matching to

competent overt word recognition (such as in patients P.S. and V.P.; Gazzaniga, LeDoux & Wilson, 1977; Sidtis, Volpe, Wilson, Rayport & Gazzaniga, 1981). These studies generally support the hypothesis that the visual processing of words by the RH may be useful for word recognition under certain circumstances. However, they also conclude that there is a clear advantage for word processing in the LH and they underline the possibility that the visual processing of words may differ between the hemispheres.

It has been proposed that the hemispheric differences in reading ability may result from a hemispheric asymmetry in spatial frequency processing, with a relative bias for higher spatial frequencies in the LH (e.g. Sergent, 1982; Kitterle, Christman & Hellige, 1990; Kosslyn, Chabris, Marsolek, & Koenig, 1992; Ivry and Robertson, 1998). In particular, the LH superiority in reading would rest on its bias towards the processing of medium-to-high spatial frequencies, which appear to be optimal for word recognition.

Many researchers have studied the spatial frequency processing abilities of the cerebral hemispheres. In low-level tasks (typically detection tasks), such as contrast sensitivity measurements, a hemispheric equivalence has typically been found (see for example Sergent, 1982; Chiarello, Senehi & Soulier, 1986; Fendrich & Gazzaniga, 1990; Hardyck, 1991; Peterzell, 1991). However, a number of low-level studies have also shown a prevalence of the RH for spatial frequency processing (see Grabowska, & Nowicka, 1996, for an exhaustive review). Furthermore, in a recent fMRI study, Woodhead et al. (2011) found the left occipitotemporal cortex to be more strongly activated than the right occipitotemporal cortex for sinwave gratings of high spatial frequencies, and vice versa for sinewave gratings of low spatial frequencies.

In high-level tasks (typically identification tasks), such a LH superiority for processing high spatial frequencies and a RH superiority for processing low spatial

frequencies has typically been reported (Sergent, 1982; Grabowska, & Nowicka, 1996). Martin (1979) was among the first to show such differences in the processing of relative spatial frequencies in normal observers through Navon's hierarchical letter patterns (for instance, a large letter 'C' visually composed of smaller letters 'A'—here, the energy of the smaller letters 'A' is limited to relatively high spatial frequencies, while the energy of the large letter 'C' lies mostly, but not exclusively, in relatively low spatial frequencies). She found that relatively higher spatial frequencies triggered quicker responses when they were presented to the LH than when they were presented to the RH. Inversely, relatively lower spatial frequencies led to quicker responses when they were presented to the RH than to the LH. Sergent (1982) came to the same conclusions with a similar task. Later studies directly linked the hierarchical letter patterns to spatial frequency content, either by reducing the lower spatial frequency content of the stimulus (Hughes, Fendrich, & Reuter-Lorenz, 1990; Lamb & Yund, 1996; Robertson, 1996) or with an adaptation procedure (with sinusoidal gratings of high or low frequency; Shulman, Sullivan, Gish & Sakoda, 1986). They found that advantages attributed to the relatively high or low spatial frequencies of the hierarchical letters could be countered by these absolute-frequency alterations, thus linking the two.

However, even in high-level tasks, findings are somewhat divergent. For example, Mercure et al. (2008) failed to find an orthogonal modulation of the N170 in the two hemispheres in function of spatial frequency content in a word and in a face one-back memory tasks. They did observe, however, an attenuation of the N170 electroencephalographic component in the LH for identifying low-pass filtered words but not for identifying high-pass filtered words.

Although the hemispheres are thought to have specific spatial frequency preferences at a low-level of processing, the precise spatial frequencies privileged

by the RH and LH for word recognition remain to be determined. Moreover, the level of processing at which these biases take place remains nebulous (see the discussion section for a more detailed account on this matter). A spatial frequency-related hemispheric specificity would have a great impact on our understanding of information processing in the brain, as it could contribute to a relatively parsimonious account for function attribution. The present study aims to understand spatial frequency processing for word recognition in the cerebral hemispheres through lateral visual presentation and has two main goals. First, to determine the spatial frequency spectrum used by each cerebral hemisphere for accurate overt word recognition. Second, to determine whether, and how, the low-level processing of spatial frequencies for accurate overt word recognition differs between hemispheres.

Issues have been brought forth concerning the use of laterally presented lexical stimuli to study hemispheric differences in reading. It has been suggested that properties specific to word processing are likely to interact with hemifield presentation, and that these properties may exert a negative bias for the recognition of words presented to the LVF in comparison to the RVF (see for example, Vitu and Schroyens, 1996). In fact, it has been shown that in the French and English languages, the 1st letter in 4- to 7-letter words carries the most information value for its accurate identification (e.g., Blais et al 2009). This letter is the most eccentric in the LVF/right hemisphere (and thus has the least visual acuity) and the least eccentric in the RVF/left hemisphere (and thus has the best visual acuity). This may impede the ability of the right hemisphere to accurately recognize words independently of its actual word processing ability. However, Bryden and his collaborators have attempted to assess the impact of the locus of information value on performance and found that it failed to influence performance. They concluded that information value does not affect hemispheric asymmetries in visual word recognition (Bryden, 1986; Bryden, Mondor, Loken, Ingleton, & Bergstrom,

1990). Furthermore, a recent study (Tadros, Morin-Duchesne, Fiset, Arguin & Gosselin, 2012) goes on to show that there is an actual processing advantage for the initial letters in the LVF despite their greater eccentricity and that performance in the LVF/right hemisphere is not disadvantaged by the fact that the initial letters (i.e. the most eccentric) carry more information value. In this context, we deem using laterally presented stimuli appropriate for studying spatial frequency use between hemispheres.

In the current study, we employed Spatial Frequency (SF) Bubbles to determine the spatial frequencies used for accurate overt word recognition by the cerebral hemispheres (Willenbockel et al., 2010; Thurman & Grossman, 2011; Willenbockel et al., 2012). Each word image will be randomly sampled in the spatial frequency domain and presented laterally to the left or right visual hemifield¹. Following a large number of trials, the spatial frequencies correlated with overt word recognition performance can be revealed for each cerebral hemisphere. A key advantage of this method over, for example, low- and high-pass filtering or band-pass filtering methods is that it allows much finer and unbiased spatial frequency tuning estimates. Thurman and Grossman (2011) looked at spatial frequency tuning for discriminating videos of human actions using SF Bubbles as well as a more traditional approach which consisted in measuring signal-to-noise ratio thresholds for videos filtered by one of six Gaussian band-pass filters. Results from both methods were consistent. However, as the authors concluded, “By comparing the data from both experiments, it is clear that one significant advantage of the SF Bubbles method over the band-pass filtering method is the resolution of the SF tuning estimates. [...] Another benefit of the SF Bubbles method is that all spatial frequencies are represented on each trial, just in different proportions, so observers are not able to adapt to particular SF bands during the experiment.” These benefits of the SF Bubbles also apply to reverse correlation (e.g. Ahumada & Lovell, 1971). One important difference

between these two methods is that the former reveals the visual information that leads to accurate responses—the so-called “potent” information—whereas the latter reveals the visual information that determines responses, accurate and inaccurate—the so-called “represented” information (see Gosselin & Schyns, 2002, 2004; see also Murray & Gold, 2004). Using SF Bubbles, we will thus be able to reveal directly, for each visual hemifield, the precise spatial frequencies used most accurately for word recognition. To our knowledge, such precise spatial frequency tuning estimates have yet to be performed for word recognition in the cerebral hemispheres.

2.3 Methods

2.3.1 Participants

Twelve normal right-handed skilful readers, students at the University of Montreal, took part in the full experiment (seven other participants were excluded following the preselection task described below). All were native French speakers and had normal or corrected-to-normal vision. Participants were preselected on the basis of their right-handedness, as assessed by the Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971), as well as on the basis of their reading abilities for words presented to the right and left visual hemifields (see the *Procedure* section for more details).

2.3.2 Material and Stimuli

The experiment ran on a 2.5 GHz Macintosh computer (Model: Dual 2.5 GHz PowerPC G5). The experimental program was developed in Matlab (Natick, MA) using functions from the Psychophysics Toolbox (Brainard, 1997; Pelli,

1997). Stimuli were displayed on a Sony Trinitron Multiscan G420 monitor measuring 45.4 cm in diagonal, with a resolution of 1024 x 768 pixels and a refresh rate of 100 Hz. The monitor was calibrated to allow a linear manipulation of luminance. The resulting corrected table contained 167 luminance levels, ranging from 0.97 cd/m² to 138.67 cd/m². The viewing distance was maintained at 49 cm by using a chinrest. Stimuli were lowercase words printed in Arial font size 30 (x-height subtending 0.64 degrees of visual angle). They appeared in black, at 45% of full contrast. They were presented over a medium grey background (halfway between white and black, 68.15 cd/m²), and were sampled in the spatial frequency domain.

The stimuli were word images constructed from a list of 4-, 5- or 6-letter French words. Nine hundred different words were used. Lexical frequency was controlled in this word list. A post-hoc analysis looked into the impact of the orthographic neighborhood size of our words and did not find a triple interaction between word length, orthographic neighborhood size and visual hemifield pertaining to accuracy rates (much like what Lavidor and Ellis, 2002, found). Each word was presented twice to each participant, once to each hemifield, with the order of hemifields counterbalanced across words. Word images were 128 x 128 pixels in size. Their spatial frequency content was extracted via Fast Fourier transform (FFT) and filtered randomly across trials following the application of SF Bubbles by Willenbockel et al. (2010; see figure 1 for an example of filtered words). In a nutshell, each spatial frequency filter was created by first generating a random vector of 4996 binary elements, following a binomial distribution, with a mean equal to the number of bubbles in the trial. Second, the resulting vector was convolved with a Gaussian kernel that had a standard deviation of 1.6. Third, we scaled the resulting convolved vector according to a logarithmic function that approximates the human visual system's spatial frequency sensitivity (see De Valois & De Valois, 1990). This entails that the energy revealed for samples of

higher spatial frequencies, to which we are less sensitive, was greater than for samples of lower spatial frequencies. The resulting convolved and log-scaled vector contained 128 elements representing each spatial frequency. Data analyses will be based on the spatial frequency vectors. To create the two-dimensional spatial-frequency filtered word images, vectors were rotated about their origins and dot-multiplied with the FFT amplitudes. For more details on the SF Bubbles method, see Willenbockel et al (2010).



Figure 1. Examples of filtered word images that were submitted to a random spatial frequency sampling using the Bubbles method. During the experimental task, the quantity of information revealed (i.e. the number of bubbles) varied according to the participant’s response accuracy.

Stimuli were right-aligned (for LH displays) or left-aligned (for RH displays) at 1.5 deg from the locus of ocular fixation – the center of the screen. Therefore, the maximal eccentricities of the letters within our stimuli were approximately 3.8, 4.4 and 4.9 deg of visual angle for words of 4, 5 and 6 letters respectively. A fixation cross was presented at the center of the screen for 570 ms before the word image. The word image then appeared on the screen for 150 ms and was followed by a grey screen that remained until the start of the next trial. The stimuli were presented for a short period of time to minimize the possibility that observers use eye movements to position the word in central vision (Cohen,

1977; Young, 1982; see also reviews by Alpern, 1962, 1971, and Carpenter, 1977). Nevertheless, because cone receptor density decreases approximately fivefold over the central two degrees (Østerberg, 1935), even small shifts from fixation may significantly affect the availability of spatial frequency information and thereby influence performance. It has thus been strongly recommended to monitor eye fixations during tasks using lateralized presentations (Jordan, Patching & Thomas, 2003). Ocular fixations were measured in participants by using the EyeLink II head-mounted eye-tracker (SR International). This system has an average gaze position error of $<0.5^\circ$, a resolution of 1 arc min and a linear output over the range of the monitor used. The trials on which the participant's gaze average was within 1.5 deg of the center of the screen and did not shift by more than .5 deg between the first half of stimulus presentation and the last half were kept for analysis.

We first attempted to maintain the number of bubbles constant and let word identification accuracy vary across hemispheres (as in Willenbockel et al., 2010). However, word identification accuracy differed so much between the two hemifields that observers either performed perfectly in the right hemifield or at chance in the left hemifield. We thus opted to maintain word identification accuracy at 50% for each visual hemifield by independently adjusting the number of bubbles on a trial-by-trial basis using a converging staircases method (Cavanagh & Anstis, 1991). These staircases start at performance extremes (i.e. where the minimal and maximal quantity of bubbles presented are 5 and 45, respectively) and then converge towards the number necessary to maintain a threshold of 50%. Implications of this paradigm decision will be considered in the *General discussion* section.

2.3.3 Procedure

2.3.3.1 Preselection Task.

Reading ability was measured through response accuracy and reading latency for full-contrast unfiltered words presented at 1.5 deg visual angle eccentricity to the left and right visual hemifields. The word list used for this preselection was made of French 4- to 7-letter words that were not used in the experimental task. Our purpose in submitting participants to a preselection task was threefold. First, we wanted to ensure that the response times of participants for words presented to the LH (i.e. the right visual hemifield) did not vary as a function of word length. Indeed normal readers do not show a word length effect (i.e. increasing reading latency with the number of letters in the word) for words presented to the right hemifield, but they usually do for words presented to the left hemifield (Bub & Lewine, 1988; Lavidor & Ellis, 2002; variations of reading latency as a function of word length for the RH were not considered for participant selection as they may interact with reading accuracy). Second, we wanted to make sure that accuracy dropped with increasing word length for words presented to the RH (left visual hemifield), as is typically encountered in normal readers. Satisfying these criteria confirms that the participants' brain regions specialized in language processing are well lateralized to the LH. Third, we wanted to ensure a sufficient baseline accuracy level. Our accuracy threshold was 80% correct for the easiest condition of the preselection task (4 letter words presented to the right hemifield). In the experimental task, the number of SF Bubbles (i.e. the quantity of information) presented in each word was varied to maintain a 50% success rate. The lower the success rate, the greater the quantity of spatial frequencies presented in the word images. However, the more different spatial frequencies were presented in a word image, the less this word allowed for discrimination of spatial frequency use (as a larger variety is presented and it becomes more difficult to dissociate the spatial frequencies used to respond correctly or incorrectly). It is for

this reason that we required a relatively high baseline accuracy, which allows significant variations in spatial frequency filtering (vs. a participant with a low baseline, who would require a larger number of SF Bubbles to maintain a 50% success rate). Following this preselection task, seven participants were excluded, and twelve were retained for the full experimental task. Most of the participants who were excluded did not satisfy the 3rd criterion, their baseline accuracy level being too low to allow for appropriate variations in spatial frequency filtering.

2.3.3.2 Experimental Task.

Each participant underwent 1,800 trials. The experiment was divided into 12 blocks of 150 trials each. Participants wore the eye-tracker helmet and a calibration of eye fixations was conducted at the beginning of each session (and once every maximum 41 trials thereafter) using a nine-point fixation procedure as implemented in the EyeLink API software (see the EyeLink Manual for details). The calibration was then validated with the EyeLink API software and repeated when necessary until the optimal calibration criterion was reached. Every five trials, participants were instructed to fixate a dot at the center of the screen for an automatic drift correction. During the trials, they were asked to maintain their gaze at the center of the screen at all times, as indicated by a fixation cross. The reader had no prior information as to the location (left or right) of the target word, which was selected randomly for each trial. After each stimulus presentation, the participant was asked to identify the word as accurately as possible. The experimenter, present in the room but out of sight of the participant, typed into the computer the response given and spelled out on every trial. He then triggered the next trial. Participants received no feedback on their performance.

2.4 Results

An average of 87% of trials ($SD = 9.6\%$) per participant met the eye-movement acceptance criteria: less than 1.5 deg of visual angle away from the fixation cross on the x-axis and less than 0.5 deg of visual angle shift on the x-axis between the first half and the last half of stimulus presentation. Group results were very robust to changes in these criteria. The following results were obtained using these accepted data. As expected, performance was poorer for words presented to the RH than for words presented to the LH. We measured performance by comparing the quantity of information (i.e. the number of bubbles) necessary to maintain a 50% accuracy rate. Words presented to the RH required a greater quantity of information ($M = 20.80$ bubbles, $SD = 2.79$ bubbles) for accurate recognition than those presented to the LH ($M = 15.84$ bubbles, $SD = 2.41$; $t(11) = 6.95$, $p < .001$, $d = 2.06$).

To determine the spatial frequencies that contribute most to word recognition in each cerebral hemisphere, we performed least-square multiple linear regressions between response accuracies and the random binary vectors used (see the *Methods* section), separately for each hemisphere and each participant. More specifically, we summed the random binary vectors weighted by the corresponding response accuracies. Then we convolved the resulting vector of regression coefficients with a Gaussian kernel having a *FWHM* equal to 2.3548 elements, standardized it according to a Bootstrap procedure (Efron & Tibshirani, 1994; Varian, 2005), and finally log-scaled it (for more details, see Willenbockel et al., 2010). The resulting vector—henceforth referred to as the classification vector—is composed of 128 regression coefficients that indicate the correlation between each spatial frequency and its corresponding response accuracy. We also computed group classification vectors for each hemisphere by summing all individual classification vectors and dividing the resulting vector by \sqrt{n} (where $n = 12$, i.e. the

number of participants). The z-scored and smoothed group classification vectors are shown on figure 2. Individual and group results were very similar within hemispheres (average $r = .94$; $SD = .034$) when comparing individual classification vectors with the group vectors for each hemifield, so we report only group results. Note that the right tails of the curves are a consequence of two things: the diagnosticity of relatively high spatial frequencies for word reading, and the coarseness of our sampling of these spatial frequencies.

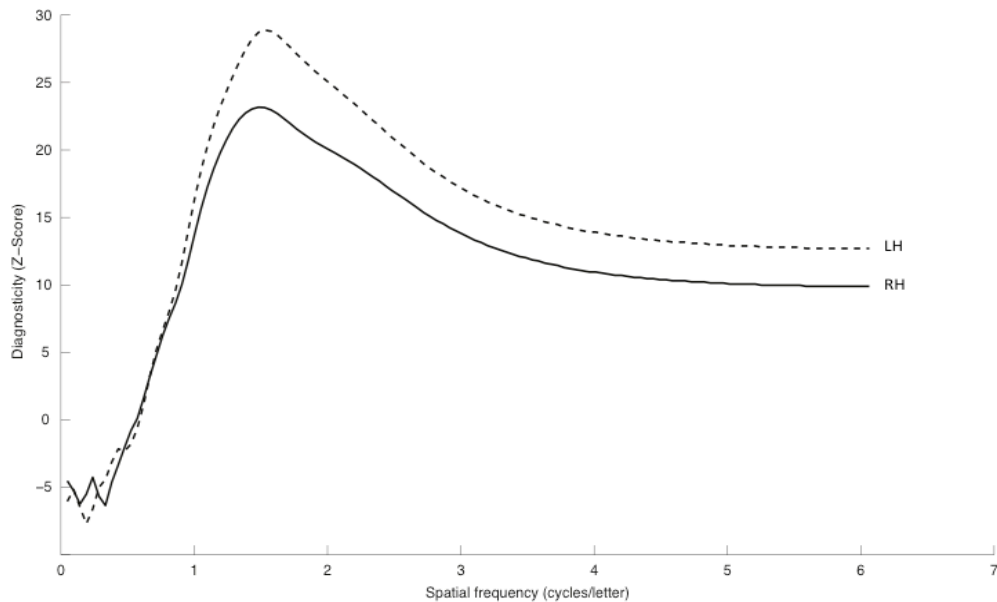


Figure 2. Diagnosticity of spatial frequencies for word recognition with stimuli presented to the two hemispheres.

The important spatial frequencies for the task at hand were revealed by their divergence from zero. A Pixel test (Chauvin, Worsley, Schyns, Arguin & Gosselin, 2005) was applied to the classification vectors of each cerebral hemisphere to expose the spatial frequencies underlying accurate word recognition for each hemisphere ($S_r = 128$, $FWHM = 2.3548$, $p < 0.05$; LH: $Z_{max} = 29.69$, Z_{crit}

= 3.37 ; RH : $Z_{max} = 22.68$, $Z_{crit} = 3.37$). We measured the spatial frequency peaks by proceeding to a 50% Area Spatial Frequency Measure (ASFM; analogous to a 50% area latency measure commonly used in EEG analysis) to the classification vector. This 50% ASFM is a better measure of the central tendency than absolute peaks would be in our experiment because it is less sensitive to the shape of the tuning curve, which was probably distorted by our sampling procedure.

The area taken into account in the 50% ASFM was the area above the very high spatial frequencies tail present in the classification vector and considered to be an artefact of the method. The significantly used spatial frequency band for words presented to the LH peaked at 2.07 cycles/letter and was 2.33 octaves wide. For words presented to the RH, the significantly used spatial frequency band peaked at 2.00 cycles/letter and was 2.90 octaves wide. Hence, optimal tuning was essentially the same for both hemispheres (accordingly, peaks did not differ statistically when data was compared within-participants). An illustration of the spatial frequencies most and least useful for word identification for words presented to the RH and LH can be seen on the word 'vision' in figure 3 a) and b). Furthermore, it is clear that the spatial frequency tuning functions of both hemispheres have the same shape, the LH's appearing as a simple upwards translation of the right's. Accordingly, z-scores corresponding to the 50% ASFM of the classification vectors are significantly higher for words presented to the LH than for words presented to the RH (z-score average of 8.86 and 6.45 respectively, $t(11) = 3.925$, $p < .005$, $d = 1.32$) but the functions remain very strongly correlated to one another: $r = 0.997$.

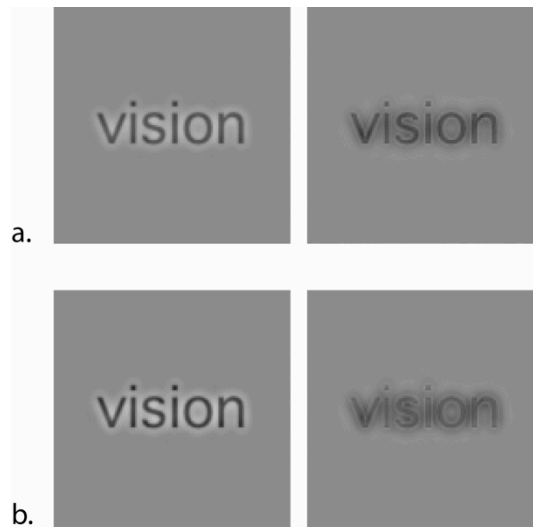


Figure 3. Illustration of the most (left) and least (right) used spatial frequencies for accurate word recognition with stimuli presented to the (a) left and (b) right visual hemifields by filtering the word ‘vision’.

Recognition accuracy for both hemispheres decreased with increasing word length¹ ($F(2,22) = 86.30, p < 0.001, \eta^2 = 0.89$). Moreover, this word-length effect was greater for words presented to the RH (4-letter words mean accuracy: 62%, 6-letter words mean accuracy: 42%; mean difference = 20%, SD = 6%) than for words presented to the LH (4-letter words mean accuracy = 55%, 6-letter words mean accuracy = 48%; mean difference = 8%, SD = 5%; $F(1,11) = 26.10, p < 0.001, \eta^2 = 0.70$).

¹ Remember that accuracy was maintained at 50% for each hemisphere without regard to word length. Thus, accuracy was allowed to vary as a function of word length within each hemisphere.

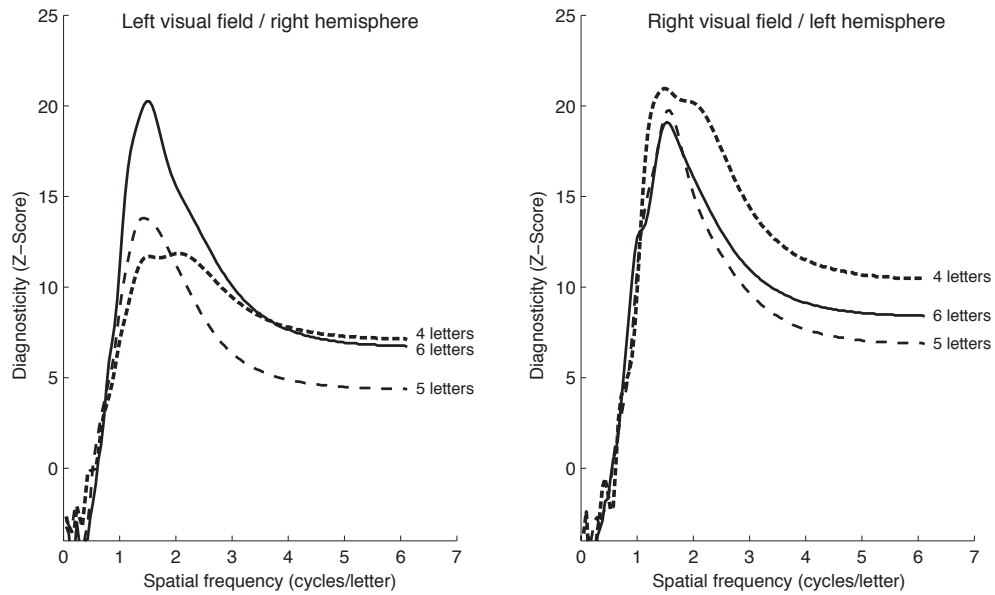


Figure 4. Diagnosticity of spatial frequencies for word recognition as a function of hemisphere and word length.

We also looked into spatial frequency tuning as a function word length and hemisphere. Once again, individual and group results were very similar within word lengths and hemispheres (average $r = .87$ when comparing individual and group classification vectors), so we only report group results. We compiled the spatial frequency tuning functions for word lengths and hemispheres separately by proceeding to separate multiple linear regressions and Pixel tests for each word length and each hemisphere ($S_r = 128$, $FWHM = 2.3548$, $p < .05$; LH, 4 letters: $Z_{\max} = 21.00$, $Z_{\text{crit}} = 3.36$, 5 letters: $Z_{\max} = 21.16$, $Z_{\text{crit}} = 3.37$, 6 letters: $Z_{\max} = 20.85$, $Z_{\text{crit}} = 3.37$; RH, 4 letters: $Z_{\max} = 12.68$, $Z_{\text{crit}} = 3.34$, 5 letters : $Z_{\max} = 18.88$, $Z_{\text{crit}} = 3.37$, 6 letters: $Z_{\max} = 12.62$, $Z_{\text{crit}} = 3.38$). The resulting spatial frequency tuning functions are presented in figure 4. The 50% ASFM computed from the individual classification vectors shifted significantly towards higher spatial frequencies as word length increased for words presented to the RH ($F(1,11) = 6.049$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.36$; 4 letters: $M = 3.21$, $SD = 1.29$; 5 letters: $M = 4.12$, $SD =$

0.94; 6 letters: $M = 4.18$, $SD = 1.07$), but not for words presented to the LH ($F(1,11) = 1.270$, $p = 0.3$, $\eta^2 = 0.10$; 4 letters: $M = 4.40$, $SD = 1.61$; 5 letters: $M = 4.93$, $SD = 1.26$; 6 letters: $M = 5.91$, $SD = 1.53$). In the RH, tuning was biased towards significantly higher spatial frequencies for words of 6 letters compared to words of 4 letters ($t(11) = 2.99$, $p < .01$, $d = 3.94$) and 5 letters ($t(11) = 2.47$, $p < .05$, $d = 3.22$). This shift in tuning implies that for longer words (that also had greater mean eccentricities in our study), the RH needed to access higher spatial frequencies for accurate identification than for shorter words.

2.5 General discussion

The goal of the present study was to uncover the spatial frequency tuning patterns for word recognition in each cerebral hemisphere and, importantly, whether they differed from one another. To do so, we presented word images randomly filtered in the spatial frequency domain to the LH or to the RH. As expected, performance, as measured by the number of bubbles required to reach target word identification accuracy overall, was poorer for words presented to the RH than for words presented to the LH. Furthermore, word identification accuracy correlated negatively with word length in both hemispheres, but especially more so for words presented to the RH. It has long been known that string length has a greater impact on visual word recognition when letter strings are presented to the RH than when they are presented to the LH (Bouma, 1973; Ellis, Young, & Anderson, 1988; Melville, 1957; Young & Ellis, 1985). In fact, the LH often does not exhibit a word-length effect at all. However, Fiset et al. (2006) have shown that removing spatial frequencies from words presented foveally, especially high spatial frequencies, produces strong word-length effects. Therefore, we are not surprised to find a word-length effect in the LH as well.

The spatial frequencies most correlated with accurate recognition were determined for each hemisphere and according to word length. Our main finding is that the spatial frequency tuning peaks for words presented to the LH and to the RH when all word lengths were collated are essentially the same, and are located at approximately 2 cycles/letter (for letters with an x-height subtending 0.64 degrees of visual angle). This entails that words presented to the RH are identified most accurately when using the same visual information as words presented to the LH (as long as the appropriate inter-hemispheric communication is possible, of course). Hence, our results do not support the hypothesis that the RH is biased towards lower spatial frequencies than the LH. The spatial frequency tuning we obtain for words lateralized to one hemisphere or the other does match the spatial frequency tuning recently reported for words presented centrally and at vertical eccentricity (Chung & Tjan, 2009). In fact, our tuning peaks fall right on the functions of peak tuning frequency for reading by letter print size that these authors obtained, both for words presented at the fovea and for words presented at vertical eccentricity.

We do however find important variations in spatial frequency use when we take a closer look at our data. A first hemispheric difference we observe in the present study is that, even though the peak spatial frequencies are the same for both hemispheres, the height of these peaks was greater in the LH than in the RH. This finding could have resulted from an artifactual cause. The least-square multiple linear regressions that we perform give rise to the greatest z-scores when the number of bubbles is such that half the search space is sampled, everything else being equal. Put differently, if the sampling of the words presented to the LH was closer to this optimal sampling than that of the words presented to the RH, we would expect to find higher peaks in the LH than in the RH, which could, in turn, have explained the effect we observe in our results with regards to these peaks. Quite to the contrary, however, we find the right hemisphere was presented stimuli

with more optimal spatial frequency sampling. This renders our empirical observation even more surprising since despite the asymmetrical sampling, which favors the regressions performed on RH data, we see higher peaks in the LH than in the RH. We believe this could have resulted from the LH being more *consistent* in its use of spatial frequencies than the RH. That is, the spatial frequencies found to be most useful for word recognition would lead more often to accurate identification in the LH than in the RH. In turn, this could mean that, at some level of visual processing, one or many factor(s) intervene(s) to increase the relative consistency of the LH. One plausible explanation pertains to the contribution of top-down processes on word recognition. The LH would possess more of these top-down interactions for word processing than the RH, possibly because it is the hemisphere responsible for overt word recognition. Consequently, the LH would be able to better target the diagnostic spatial frequencies through top-down feedback.

The most important hemispheric difference we find in our data is a shift towards the use of *higher spatial frequencies* for longer words presented to the RH but not to the LH. As we mentioned above, more bubbles were required in the RH than in the LH to reach target performance. Therefore, we cannot rule out entirely that this difference between the stimuli presented to the two hemispheres is somehow responsible for the shift toward higher spatial frequencies in the RH. However, we believe this is unlikely because, were it the case, the hemisphere submitted to the most impoverished words would be most affected — and we observe the exact opposite. Rather we believe that this shift in spatial frequency use as a function of word length may reflect the RH's attempt to diminish the impact of visual crowding.

Letters closer together than a critical spacing are seen as an unidentifiable jumble—they are "crowded" (e.g. Bouma, 1970; Pelli et al., 2007; see Whitney &

Levi, 2011, for a recent review of findings on crowding). Chung and Tjan (2007) observed a small shift towards using higher spatial frequencies when presenting highly crowded letters, much like we observe with increased word length. One reason for this shift may be that higher frequencies give for a finer discrimination of the different features composing the letters in the word. But why would crowding increase with word length? The mean eccentricity of letters increased with word length in our experiment so that the most eccentric letters were at approximately 4.9 deg of visual angle for 6-letter words and at approximately 3.8 deg of visual angle for 4-letter words. The so-called "Bouma law" states that the critical spacing between letters is roughly half the eccentricity (Bouma, 1970). In other words, crowding increases with eccentricity and, in our experiment, with word length. There is one more aspect of our finding that remains to be explained by this crowding hypothesis: Why don't we observe a similar shift in spatial frequency use in the LH? The "visual span", which is defined qualitatively as the number of letters in a nonsensical string of letters that can be recognized reliably without moving the eyes, is known to be largely determined by crowding, and this visual span is usually compressed in the left hemifield relatively to the right (Legge et al., 2007). This suggests that the RH is subject to more crowding than the LH, at least when processing letters. Obviously, more research will be necessary to put this hypothesis to the test.

2.6 Acknowledgements

We thank the participants who collaborated to this demanding experiment. The following financial support is acknowledged: A grant from the Canadian Institutes for Health Research to Martin Arguin, Frédéric Gosselin, and Daniel Bub. Karine Tadros and Nicolas Dupuis-Roy are supported by a graduate scholarship from the Fonds Québécois de Recherche en Nature et Technologies (FQRNT).

2.7 References

- Ahumada, A. J. & Lovell, J. (1971). Stimulus features in signal detection. *Journal of the Acoustical Society of America*, *49*, 1751-1756.
- Alexander, K.R., Xie, W., & Derlacki, D.J. (1994). Spatial-frequency characteristics of letter identification. *Journal of the Optical Society of America*, *11*, pp. 2375–2382.
- Alpern, M. (1962). Muscular mechanisms. In H. Davson (Ed.), *The eye* (Vol. 3). New York: Academic Press.
- Alpern, M. (1971). Effector mechanisms in vision. In J. A. Kling & L. A. Riggs (Eds.), *Woodworth and Schlosberg's experimental psychology* (3rd ed.). New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Blais, C., Fiset, D., Jolicoeur, P., Arguin, M., Bub, D. & Gosselin, F. (2009). Reading between eye saccades. *PLoS ONE*, *4*(7), e6448, doi:10.1371/journal.pone.0006448.
- Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, *226*, 177–178.
- Bouma, H. (1973). Visual interference in the parafoveal recognition of initial and final letters of words. *Vision Research*, *13*, 767–782.
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, *10*, 433-436.
- Bryden, M. P., & Allard, F. (1976). Visual field differences depend on typeface. *Brain and Language*, *3*, 191-200.
- Bub, D. N., & Lewine, J. (1988). Different modes of word recognition in the left and right visual fields. *Brain and Language*, *33*, 161–188.
- Carpenter, R. H. S. *Movements of the eyes*. London: Peon, 1977.
- Cavanagh, P. & Anstis, S.M. (1991) The contribution of color to motion in normal and color-deficient observers. *Vision Research*, *31*, 2109–2148.

- 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. <http://www.journalofvision.org/content/5/9/1>, doi: 10.1167/5.9.1
- Chiarello, C., Senehi, J., & Soulier, M. (1986). Viewing conditions and hemispheric asymmetry for the lexical decision. *Neuropsychologia*, 24, 521-529.
- Chung, S.T.L., Legge, G.E., & Tjan, B.S. (2002). Spatial-frequency characteristics of letter identification in central and peripheral vision. *Vision Research*, 42, 2137-2152.
- Chung, S.T.L. & Tjan, B.S. (2007). Shift in spatial scale in identifying crowded letters. *Vision Research*, 47, 437-451.
- Chung S. T., & Tjan B. S. (2009). Spatial-frequency and contrast properties of reading in central and peripheral vision. *Journal of Vision*, 9(1), 611-619. <http://www.journalofvision.org/content/9/9/16>, doi:10.1167/9.9.16
- Cohen, L., Martinaud, O., Lemer, C., Lehericy, S., Samson, Y., Obadia, M., Slachevsky, A., & Dehaene, S. (2003). Visual word recognition in the left and right hemispheres: Anatomical and functional correlates of peripheral alexia. *Cerebral Cortex*, 13, 1313-1333.
- Cohen, M. E., & Ross, L. E. (1977). Saccade latency in children and adults: Effects of warning interval and target eccentricity. *Journal of Experimental Child Psychology*, 23, 539-549.
- Coslett HB & Monsul N (1994) Reading with the right hemisphere: evidence from transcranial magnetic stimulation. *Brain and Language*, 46, 198-211.
- Coslett, H., & Saffran, E. (1998). Reading and the right hemisphere: evidence from acquired dyslexia. In: M., Beeman, C., Chiarello (Eds.), *Right hemisphere language comprehension* (105-132). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates
- Deason, R.G. & Marsolek, C.J. (2005). A critical boundary to the left-hemisphere advantage in word processing. *Brain and Language*, 92, 251-261.

- Delis, D., Robertson, L. C., & Efron, R. (1986). Hemispheric specialization of memory for visual hierarchical stimuli. *Neuropsychologia*, *24*, 205–214.
- DeValois, R. and DeValois, K. (1990). *Spatial Vision*. Oxford University Press. New York, N.Y.
- Doniger, G.M., Foxe, J.J., Murray, M.M., Higgins, B.A., Snodgrass, J.G., & Schroeder, C.E. (2000). Activation time course of ventral visual stream object-recognition areas: high density electrical mapping of perceptual closure processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 615–621.
- Ellis, A. W., Young, A. W., & Anderson, C. (1988). Modes of word recognition in the left and right cerebral hemispheres. *Brain and Language*, *35*, 254–273.
- Efron, B. & Tibshirani, R. J. (1994). *An Introduction to the Bootstrap*, CRC Press, Boca Raton, F.L.
- Eckstein M. P., & Ahumada, Jr. A. J. (2002). Classification images: A tool to analyze visual strategies. *Journal of Vision*, *2* (1), i-i, <http://journalofvision.org/2/1/i/>, doi:10.1167/2.1.i
- Fendrich, R., & Gazzaniga, M. (1990). Hemispheric processing of spatial frequencies in two commissurotomy patients. *Neuropsychologia*, *28*, 657–663.
- Fiset, D., Blais, C., Arguin, M., Tadros, K., Éthier-Majcher, C., Bub, D. & Gosselin, F. (2009). The spatio-temporal dynamics of visual letter recognition. *Cognitive Neuropsychology*, *26*, 23-35.
- Fiset, D., Gosselin, F., Blais, C. & Arguin, M. (2006). Inducing letter-by-letter dyslexia in normal readers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*, 1466-1476.
- Fiset, S., Arguin, M., & Fiset, D. (2006). An attempt to simulate letter-by-letter dyslexia in normal readers. *Brain and Language*, *98*, 251-263.
- Gauthier, I., Skudlarski, P., Gore, J.C., & Anderson, A.W. (2000). Expertise for cars and birds recruits brain areas involved in face recognition. *Nature Neuroscience*, *3*, 191-197.

- Gazzaniga, M. S., LeDoux, J. E., & Wilson, D. H. (1977). Language, praxis, and the right hemisphere: clues to some mechanisms of consciousness. *Neurology*, *27* (12), 1144-1147.
- Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2001). Bubbles: A technique to reveal the use of information in recognition. *Vision Research*, *41*, 2261-2271.
- Gosselin, F. & Schyns, P. G. (2002). RAP: a new framework for visual categorization. *Trends in Cognitive Science*, *6*, 70-77.
- Gosselin, F. & Schyns, P. G. (2004). No troubles with Bubbles: A reply to Murray and Gold. *Vision Research*, *44*, 471-477.
- Grill-Spector, K., Kourtzi, Z., & Kanwisher, N. (2001) The Lateral Occipital Complex and its Role in Object Recognition. *Vision Research*, *41*, 1409-1422
- Grill-Spector, T., Kushnir, Edelman, S., Itzhak, Y. & Malach, R. (1998). Cue-invariant activation in object-related areas of the human occipital lobe. *Neuron*, *21*, 191–202.
- Hardyck, C. (1991). Shadow and substance: attentional irrelevancies and perceptual constraints in the hemispheric processing of language stimuli. In F.L. Kitterle (Ed.) *Cerebral laterality: theory and research*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Howell W. & Kraft C. (1960) Size, Blur, and Contrast as Variables Affecting the Legibility of Alphanumeric Symbols on Radar-type Displays. *WADC Technical Repeport*, 59-536, Wright-Patterson AFB, Ohio.
- Hughes, H. C., Fendrich, R., & Reuter-Lorenz, P. A. (1990). Global versus local processing in the absence of low spatial frequencies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *2*, 272–282.
- Iidaka, T, Yamashita, K., Kashikura, K., & Yonekura, Y. (2004). Spatial frequency of visual image modulates neural responses in the tempo-

- occipital lobe. An investigation with event-related fMRI. *Cognitive Brain Research*, *18*, 196-204.
- Ivry, R. B., & Robertson, L. C. (1998). *The two sides of perception*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Jordan, T.R., Patching, G.R. & Thomas, S.M. (2003). Assessing the role of hemispheric specialization, serial-position processing, and retinal eccentricity in lateralized word recognition. *Cognitive Neuropsychology*, *20*, 49–71.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. (1997). The Fusiform Face Area: A Module in Human Extrastriate Cortex Specialized for the Perception of Faces. *Journal of Neuroscience*, *17*, 4302-4311
- Kourtzi, Z. & Kanwisher, N. (2000). Cortical regions involved in perceiving object shape. *Journal of Neuroscience*, *20*, 3310–3318.
- Lamb, M. R., & Yund, E. W. (1996). Spatial frequency and attention: Effect of level-, target-, and location-repetition on the processing of global and local forms. *Perception & Psychophysics*, *58*, 363–373.
- Lavidor, M., & Ellis, A. W. (2002). Word length and orthographic neighbourhood size effects in the right and left cerebral hemispheres. *Brain and Language*, *80(1)*, 45-62.
- Legge, G. E., Pelli, D. G., Rubin, G. S., & Schleske, M. M. (1985). Psychophysics of reading: I. Normal vision. *Vision Research*, *25*, 239-252.
- Legge G. E., Rubin G. S., & Luebker A. (1987). Psychophysics of reading V: The role of contrast in normal vision. *Vision Research*, *27*, 1165–1177.
- Legge, G.E., Cheung, S-H, Yu, D., Chung, S., Lee, H-W, Owens, D. (2007). The case for the visual span as a sensory bottleneck in reading. *Journal of Vision*, *7(2):9*, 1-15.
- Majaj, N. J., Pelli, D. G., Kurshan, P., & Palomares, M. (2002). The role of spatial frequency channels in letter identification. *Vision Research*, *42*, 1165–1184.

- Martin, M. (1979). Hemispheric specialization for local and global processing
Neuropsychologia, 17, 33-40.
- Melville, J. P. (1957). Word-length as a factor in differential recognition.
American Journal of Psychology, 70, 316–318.
- Mercure, E., Dick, F., Halit, H., Kaufman, J. & Johnson, M. (2008). Differential
Lateralization for Words and Faces : Category or Psychophysics? *Journal of
Cognitive Neuroscience*, 20(11), 2070-2087.
- Murray, R. F. & Gold, J. M. (2004). Troubles with Bubbles. *Vision Research*, 44,
461–470.
- Murtha, S., Chertkow, H., Bearegard, M. & Evans, A. (1999) The neural
substrate of picture naming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, pp. 399–
423
- Oldfield R.C. (1971) The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh
inventory. *Neuropsychologia*, 9 ,97–113.
- Østerberg, G. A. (1935). Topography of layer rods and cones in the human retina.
Acta Ophthalmology (Suppl.), 6, 1–102.
- 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. (2006). Feature
detection and letter identification. *Vision Research*, 46, 4646-4674.
- Peterzell, D. H. (1991). On the nonrelationship between spatial frequency and
cerebral hemispheric competence. *Brain & Cognition*, 15, 62-68.
- Plaut, D. C. and Shallice, T. (1993). Deep dyslexia: A case study of connectionist
neuropsychology. *Cognitive Neuropsychology*, 10, 377-500.
- Robertson, L. C. (1996). Attentional persistence for features of hierarchical
patterns. *Journal of Experimental Psychology: General*, 125, 227–249.
- Robertson, L., Delis, D. C. (1986). Part-whole processing in unilateral brain
damaged patients: Dysfunction of hierarchical organization.
Neuropsychology, 24, 363-70.

- Robertson, L. C., Lamb, M. R., & Zaidel, E. (1993). Callosal transfer and hemisphere laterality in response to hierarchical patterns: Evidence from normal and commissurotomed subjects. *Neuropsychology*, *7*, 325–342.
- Sergent, J. (1982). Theoretical and methodological consequences of variations in exposure duration in visual laterality studies. *Perception and Psychophysics*, *3*(1), 451-461.
- Sergent, J. (1983). The role of the input in visual hemispheric processing. *Psychological Bulletin*, *93*, 481-512.
- Sidtis J.J., Volpe B.T., Holtzman J.D., Wilson D.H., Gazzaniga M.S. (1981). Cognitive interaction after staged callosal section: evidence for transfer of semantic activation. *Science*, *212*, 344–346.
- Shulman, G. L., Sullivan, M. A., Gish, K., & Sakoda, W. J. (1986). The role of spatial frequency channels in the perception of local and global structure. *Perception*, *15*, 259–279.
- Solomon J.A., & Pelli D.G. (1994). The visual filter mediating letter identification. *Nature*, *369*(6479), 395-397.
- Tadros K., Morin-Duchesne X., Arguin M., Gosselin F. (2012, February). The Letter processing strategy for reading is invariant across the cerebral hemispheres. *Presented at the 40th Annual International Neuropsychological Society Meeting, Montreal, Canada.*
- Thurman, S.M & Grossman, E.D. (2011). Diagnostic spatial frequencies and human efficiency for discriminating actions. *Attention, Perception & Psychophysics*, *73*(2), 572-580.
- Van Nes F. L. and Jacobs J. C. (1981) The effects of contrast on letter and word recognition. *IPO Annual Progress Report*, *16*, 72-80.
- Varian, H. (2005) Bootstrap Tutorial. *Mathematica Journal*, *9*, 768-775.
- Whitney, D. & Levi, D. (2011). Visual Crowding : a fundamental limit on conscious perception and object recognition. *Trends in Cognitive Science*, *15*(4), 160-168.

- Willenbockel, V., Fiset, D., Chauvin, A., Blais, C. Arguin, M., Tanaka, J., Bub, D. & Gosselin, F. (2010). Does face inversion change spatial frequency tuning? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*, 122-135.
- Woodhead, Z., Wise, R., Sereno, M. & Leech, R. (2011). Dissociation of Sensitivity to Spatial Frequency in Word and Face Preferential Areas of the Fusiform Gyrus. *Cerebral Cortex*, *21*, 2307-2312.
- Young, A. (1982). Methodological theoretical bases of visual hemifield studies. In: J.G. Beaumont, Editor, *Divided Visual Field Studies of Cerebral Organization*, Academic Press, New York.
- Young, A. W., & Ellis, A. W. (1985). Different methods of lexical access for words presented to the left and right visual hemifields. *Brain and Language*, *24*, 326–358.

3 Deuxième étude

**Reading Window: A lexical-specific visual processing strategy as a
determinant for the perceptual acuity of words**

Karine Tadros¹, Xavier Morin Duchesne¹, Daniel Fiset², Martin Arguin¹
& Frédéric Gosselin¹

¹Centre de Recherche en Neuropsychologie Expérimentale et Cognition,
Département de Psychologie, Université de Montréal.

²Département de Psychoéducation et de Psychologie, Université du Québec en
Outaouais

3.1 Abstract

Words presented in visual periphery are read less efficiently in the left visual field (LVF) than in the right (RVF). A possible determinant of this asymmetry is the impact of visual eccentricity on acuity, given the way letter positions vary in their information value. We examined letter identification biases for words presented to the LVF or the RVF by varying the information value across letter positions. The lateralized stimuli (100 ms duration) were five-letter pseudowords containing one of five familiar high-probability bigrams, either at their beginning or at their end. They were followed by a cue indicating the letter to identify. Our findings reveal a hemifield asymmetry on the impact of information value and argue against the hypothesis of eccentricity exerting a negative bias for LVF words. Interestingly, they suggest a processing strategy specific to lexical stimuli.

3.2 Introduction

It is common knowledge that words are usually processed more efficiently for reading by the left hemisphere than by the right (in right handed individuals). This difference in ability is often measured with lateralized presentations, where a word is either presented to the right or to the left of a central fixation point. Words presented to the left visual field (LVF) are thus initially processed by the right hemisphere, whereas those presented to the right visual field (RVF) are initially processed by the left hemisphere, and show better reading efficiency both in latency and accuracy (for overviews on lateralized word recognition, see Bradshaw & Nettleton, 1983; Chiarello, 1988; Hellige, 1993). Results from such experiments are thought to reflect hemispheric specialization for a specific stimulus processing. However, Efron (1990) insists that hemispheric specialization is but one of the many factors likely to influence performance with lateralized presentation (others factors underlined by Efron include subject characteristics, stimulus properties, processing strategies and method used to measure performance).

More specifically for word recognition, stimuli presented laterally are located in visual periphery, where visual acuity is reduced. This is likely to impact visual identification ability since visual acuity decreases as eccentricity increases and the accurate identification of stimuli such as letters and words becomes more difficult. However, the effect of eccentricity on word recognition is thought to be unequal between the hemifields. In fact, it has been suggested that properties specific to word processing are likely to interact with hemifield presentation, and that these properties may exert a negative bias for the recognition of words presented to the LVF in comparison with the RVF (see for example Brysbaert, Vitu & Schroyens, 1996). This may impede the ability of the right hemisphere to accurately recognize words independently of its actual word processing ability.

Specifically, previous researchers (e.g. Kirsner & Schwartz, 1986; Brysbaert, Vitu & Schroyens, 1996) have brought forth the possibility that reading abilities for words presented to the RVF benefit from a physical property of word recognition: that our words are intended to be read from left to right. Thus it is quicker to read a word that appears to the right of the fixation point than a word that appears to the left, because the first letter is closer to the point of ocular fixation at the moment the word appears. Researchers have tested this hypothesis using languages read from right to left. They mostly find that the left to right reading pattern does not play a decisive role in favouring the RVF for word processing. For instance, Orbach (1967), found a RVF advantage for Hebrew words in right-handed readers, as did others afterwards (Carmon, Nachson & Starinsky, 1976; Faust, Kravetz & Babkoff, 1993; see however Melamed & Zaidel, 1993, who found no hemispheric asymmetry in Farsi readers).

Attentional scanning properties have also been hypothesized to affect performance between hemifields. Proposed first by Heron (1957) and then Efron, Yund & Nichols (1987), one such hypothesis states that the RVF would be “scanned” first, and the LVF afterwards. In their study, Efron et al. present a horizontal series of six pattern images to the left or right of fixation for a very short period of time. Participants were required to accurately perceive these patterns. Because of the short presentation time, it is the afterimage of the series that is being “scanned”, and it becomes more difficult to accurately perceive this afterimage as time goes on because it deteriorates. Based on their participants’ performance patterns, the authors concluded that the RVF is scanned first, from left to right, followed by the LVF, again from left to right.

Another property, lexical this time, which is likely to disadvantage the LVF in comparison with the RVF is the information value of different letter positions within words (Kirsner & Schwartz, 1986). It has recently been shown that in the

French and English languages, the 1st letter in 4- to 7-letter words carries the most information value for its accurate identification (Blais et al 2009). It is followed in importance by the 3rd and the 4th letters in 5-letter words (the order of importance of these two letters is reversed for some word lengths). Because they carry more information value, it is more important to identify these letters (in particular the 1st) than the others in the word. However, letter positions within words presented laterally are not located at the same distance from fixation in each hemifield. For RVF presentations, the 1st letter position is closest to the fovea and thus benefits from the best visual acuity (thus the best potential for accurate identification) in comparison with the other letters of the lateralized word. For the LVF, the 1st letter position is the most eccentric and thus has the worst visual acuity. It is easily conceivable that the retinal location of the first letter gives a considerable advantage to the RVF for accurate word recognition. This premise thus clearly has the potential to account for at least part of the LVF disadvantage in word processing usually attributed to the right hemisphere's lesser word processing capacities.

Prior studies have attempted to assess the impact of the information value of different letter positions on their identification probability, for example by taking words that could either be determined by their first letters and / or by their last letters, to see if this bias would be reversed (Bryden, 1986; Bryden, Mondor, Loken, Ingleton, & Bergstrom, 1990). For instance, Bryden et al (1990) presented an equal number of French words in which the first two letters or the last two letters contained a higher information value. They report that the locus of information value in their naming and lexical decision tasks failed to influence performance and concluded that information value does not affect hemispheric asymmetries in visual word recognition. However, although no global impact of information value on performance is observed in their data, we note that they measured only the identification of the word as a whole and thus that they did not

assess the effect of information value on identification ability for each letter position within a word. This seems incomplete, as recognition accuracy for different letter positions may interact with information value and differ between the hemifields, particularly for eccentric letters. Another potentially problematic issue with this study is the use of real words, originating from the real lexicon, in which information value is on average highest for the 1st, 3rd and 4th letters. Readers would thus have been trained their whole life to read all the words from this specific lexicon in a certain way which is optimal overall. It appears unlikely that they would be enticed to alter this normally optimal strategy because a subset of words in an experiment is incompatible with it. To fully assess the impact of information value on word recognition in each visual field, it is important to look into the interaction of information value and letter position within a letter string, with a novel lexicon previously unknown to the reader that takes into account a new distribution of information value across letter positions.

The goal of the present study is to explore hemifield biases for the accurate recognition of different letter positions in a novel lexicon in which the information value of letter positions is overtly manipulated. This aims to dissociate the impacts of information value and of eccentricity on letter recognition ability for letter strings presented to the LVF and to the RVF. We also measured the readers' visual span to examine the interaction between letter position and visual eccentricity in each visual hemifield.

To anticipate, our findings indicate that discrimination abilities are better for the first letter in comparison to other letters despite their greater eccentricity in the LVF. We also find a visual processing advantage for the most eccentric letters, which ought to be more difficult to perceive, in both visual fields. Hence, for words presented to the LVF, greater information value does not impede reading

abilities when it is at the beginning of the word (and more eccentric) but rather when it is towards the end of the word (and closer to the fovea).

3.3 Methods

3.3.1 Participants

Eleven normal right-handed readers, students at the University of Montreal, completed the experiment (four other participants were excluded following a preselection task as explained below). All were native French speakers and had normal or corrected-to-normal vision. Participants were preselected on the basis of their reading abilities for words presented to the LVF and to the RVF (see the *Procedure* section for more details).

3.3.2 Material and Stimuli

The experiment ran on a 2.5GHz Macintosh computer (Model : Dual2.5 GHz PowerPC G5). The experimental program was developed in Matlab (Natick, MA) using functions from the Psychophysics Toolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997). Stimuli were displayed on a Sony Trinitron Multiscan G420 monitor measuring 45.4 cm in diagonal, with a resolution of 1024 x 768 pixels and a refresh rate of 100 Hz. The viewing distance was maintained at 57 cm by using a chinrest. Stimuli were lowercase pseudowords printed in Courier New in bold font size 23. Letters subtended 0.5 degree of visual angle in x-height. Because the x is square and the font is mono-spaced, letter width was also approximately 0.5 degrees. The stimuli were presented in black over a white background.

The stimuli were five-letter pseudowords in which the information value across letter positions was controlled. We picked eight two-letter combinations

(i.e. bigram or BI), which could be inverted from condition 1 to condition 2. They were “if”, “er”, “di”, and “ru” in condition 1 and became “fi”, “re”, “id”, and “ur” in condition 2. Because participants were trained to learn the bigrams by heart in each condition before undergoing the experimental task (see below for more details), identifying one of the letters in the correct position led to an accurate identification of the bigram, reducing the information value of both letters by half. Knowing these bigrams by heart further reduced the information value for their constituent letters as participants could identify them by means of deduction at a lower level of perceptual acuity than that required for the complete identification of the letters, which was required for the other three letters of the pseudoword. The trained bigrams were presented at the end of the letter strings in the 1st condition and at their beginning in the 2nd condition. Each pseudoword was completed with a random consonant-vowel-consonant (CVC) or vowel-consonant-vowel (VCV) combination, so that every consonant was preceded and followed by a vowel and vice versa. The goal of this procedure was to make sure all pseudowords were easily pronounceable. All 5-letter pseudowords meeting the above criteria were then compared to a French word database (Lexique 3; New, Pallier, Ferrand & Matos, 2001), and the letter strings corresponding to existing words were removed. We were then left with a 4003 pseudoword database for the first condition and a 4017 pseudoword database for the second condition, from which all the stimuli for our tasks were randomly selected on every trial. Examples are, for the condition where information value was higher at the beginning of the pseudoword (also referred to as the ABC-BI condition), “badif” for the CVC-BI variant and “uzodi” for the VCV-BI variant, and for the condition where information value was higher at the end of the pseudoword (the BI-ABC condition) “retob” for the BI-CVC variant and “ureda” for the BI-VCV variant.

Stimuli were right-aligned (for left hemispheric displays) or left-aligned (for right hemispheric displays) at 1.5 deg from the locus of ocular fixation – the

center of the screen. Because we used a mono-spaced font, each letter occupied 0.5 degrees of the visual field and words appeared between 1.5 and 4 degrees of eccentricity. A red fixation cross was presented at the center of the screen for 400 ms before the word image, along with cue precursors. These precursors were straight red vertical lines that appeared directly above and below each letter location. The word image then appeared randomly to the left or right of fixation on the screen for 100 ms, and was followed by a white screen onto which the red lines remained. The lines directly above and below a randomly selected letter became vertical arrows pointing to the letter location 1 second after the word image had disappeared and remained there until the next trial. The delay between presentations of the word image and the cue was implemented to prevent participants from benefiting of visible persistence, i.e. the extended visibility of a visual image after its physical presentation, to correctly identify the letter. This forced participants to process the pseudoword and ensured they could not rely on visual aftereffects for letter identification. Although randomly selected, both the letter location to identify and the hemifield to which the pseudoword was presented were counterbalanced across trials.

The stimuli were presented for a short period of time to prevent participants from using eye movements to position the word in central vision. Although 100 ms is too short to allow for eye movement towards the presented word, especially as the hemifield of presentation was randomly selected on each trial, ocular fixations were also measured in five participants by using the EyeLink II head-mounted eye-tracker (SR International), to measure the possible impact of gaze location during word presentation. This system has an average gaze measurement error of $<0.5^\circ$, a resolution of 1 arc min and a linear output over the range of the monitor used. Participants subjected to the eye-tracker wore the camera-mounted headband necessary to measure eye movements. Only one eye of each participant was tracked although viewing was binocular. A manual calibration of eye fixations was

conducted at the beginning of each session (and after a maximum of 41 trials thereafter) using a nine-point fixation procedure as implemented in the EyeLink API software (see EyeLink Manual for details). The calibration was then validated with the EyeLink API software and repeated when necessary until the optimal calibration criterion was reached. Every 5 trials, participants were instructed to fixate a dot on the center of the screen to perform an automatic drift correction. The experimental trials on which these participants' gaze average was within 1.5° of the center of the screen and did not shift by more than $.5^\circ$ between the first half of the trial and the last half were considered visually stable. With these strict criteria, 54% of the trials were considered visually stable. These trials did not differ significantly from the complete data set of these five participants, nor from the combined data sets of all participants. We thus conclude that the entire data set was not altered by eye movements and that it is valid for analysis and interpretation.

3.3.3 Procedure

3.3.3.1 Preselection task

We submitted participants to a preselection task to ensure that reading ability was lateralized to the left hemisphere and sufficient for the task at hand. Response accuracy and reading times were measured for full-contrast unfiltered words presented at 1.5 deg. of eccentricity to the LVF or to the RVF. The word list used for this preselection was composed of existing French 4- to 7-letter words. Our first criterion for selection was that the participants' reaction times for words presented to the left hemisphere (to the RVF) did not vary as a function of word length. Our second criterion was that the participants' accuracy rates dropped as a function of word length for words presented to the right hemisphere (LVF; see for

example Bub & Lewine, 1988; Lavidor & Ellis, 2002). This pattern of performance is what is expected in right-handed normal readers and it confirms that the participants' brain regions specialized in language processing are well lateralized to the left hemisphere. Our third and last criterion was that participants had an accuracy rate of at least 80% for the easiest condition of the preselection task (4-letter words presented to the right hemifield), ensuring a sufficient baseline accuracy level. Following this preselection task, four participants were rejected and did not undergo the full experimental task.

3.3.3.2 Visual Span

A person's ability to identify stimuli such as letters, perfectly detectable otherwise, is lessened when they are closely surrounded by similar stimuli. This perceptual barrier is known as visual crowding. For stimuli of the same size, the negative impact of visual crowding on performance becomes more important as eccentricity increases (see Whitney and Levi, 2011, for a recent review of findings on visual crowding and its properties). An observer's visual span is determined by the horizontal retinal eccentricity up to which he can accurately identify letters in strings (O'Regan, 1990), and is largely determined by visual crowding. The visual span varies between individuals (see for example Legge, Ahn, Klitz & Luebker, 1997) and it has been found to impact upon reading ability (e.g. reading speed; Legge, Cheung, Yu, Chung, Lee & Owens, 2007) by acting as a low-level visual constraint. It was thus measured in each participant prior to the experimental task to assess the impact of the visual span on performance as a function of eccentricity. The visual span was measured by presenting three-letter strings in lateral eccentricity to the left or right of the point of ocular fixation. Letters were set in Courier New font in bold and at a font size of 43. They subtended 0.5 degrees of visual angle and were presented in black on a white background.

Participants were placed at 1 m from the screen and asked to fixate a red cross that appeared at the center of the screen. The letter strings were then randomly presented for 100 ms to the left or right of fixation, with the trigram being centered at 1.75, 2.25, 2.75, 3.25 and 3.75 degrees of visual angle from fixation. They were followed by a white screen that remained until the beginning of the next trial. Participants were asked to identify the entire trigram by typing it into the computer using the keyboard.

3.3.3.3 Training Period

Participants were trained to learn the four bigrams used in each condition immediately prior to testing in that condition. Bigrams were explicitly shown and participants were given a reference sheet they could use throughout the training period. They were asked to identify centrally-presented randomly selected pseudowords from our database containing these bigrams. Participants underwent two blocks of 100 trials and were quizzed afterwards to verify that they knew the bigrams by heart – they had to be able to recite them all, prior to undergoing the experimental task.

3.3.3.4 Experimental Task

Each participant underwent 250 trials for each condition. The experiment lasted 45 min per condition, and participants were offered a break between conditions. Six participants underwent condition 1 first, followed by condition 2, and 5 participants underwent condition 2 first, followed by condition 1. Participants had no prior information as to the location (left or right) of the target word, which was selected randomly for each trial, and they were asked to maintain

their gaze at the center of the screen at all times, as indicated by a fixation cross. After each stimulus presentation, they were asked to identify the letter indicated by the cue as accurately as possible. The experimenter, present in the room but out of sight of the participant, typed into the computer the response given on every trial. The next trial was then triggered by the experimenter. Participants received no feedback on their performance.

3.4 Results

We assessed the impact of information value and letter position on accurate letter identification for pseudowords presented to the LVF and to the RVF, as well as the contribution of low-level factors (i.e. visual span and eccentricity) on performance. To do so, we proceeded to analyses of variance (ANOVAs) on accuracy rates as a function of information value, letter position within a pseudoword, and visual hemifield. Also using ANOVAs, we compared the participants' accuracy rates for the experimental task and the visual span task for the LVF and the RVF. We did this by matching the pseudoword's letter positions with the corresponding letter positions in the visual span. Hence, the first letter of the pseudoword was compared to the first letter of the visual span task's trigrams when it was presented at the same eccentricity (i.e. centered at 1.75 degrees of visual angle), the last letter of the pseudoword was compared to the last letter of the trigram at the same eccentricity (centered at 3.75 degrees of visual angle), and the middle letters of the pseudowords were compared to the middle letter of the trigrams when they were presented at the same eccentricity (centered at 2.25, 2.75 or 3.25 degrees of visual angle). Finally, we examined the interactions between these factors for letter identification performance in detail by means of t-tests.

As expected, performance was globally better for pseudowords presented to the RVF (thus initially to the left hemisphere; average accuracy rate of .79, $SD = .033$) than for pseudowords presented to the LVF (right hemisphere; accuracy rate of .68, $SD = .033$; $F(10,1) = 42.86$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.811$). For both hemifields combined, performance varied significantly according to letter position ($F(40,4) = 44.76$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.817$, see figure 5). Furthermore, significant interactions were found between hemifield and letter position ($F(4,40) = 10.20$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.505$), indicating dissimilar response patterns between hemifields (see the mean letter identification accuracy rates for each letter position, condition, and hemifield; figure 5).

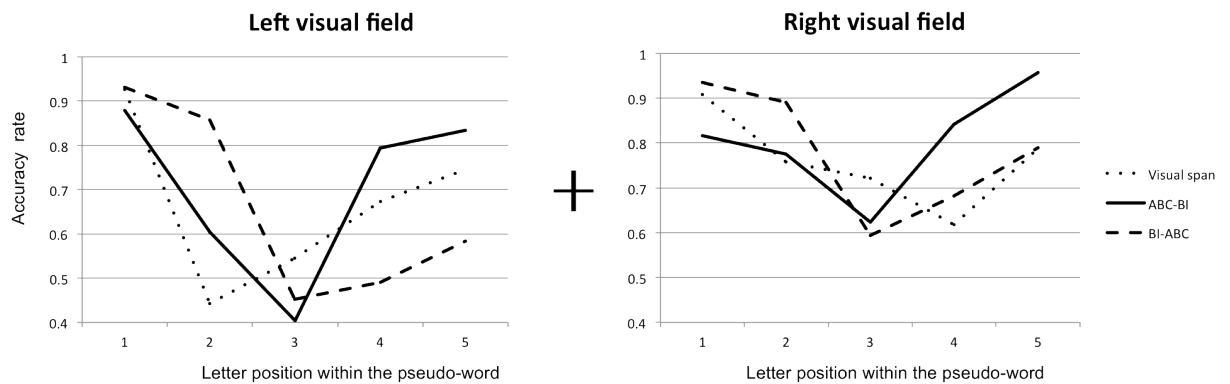


Figure 5. Mean accuracy identification rates for the five letter positions within the pseudoword for the ABC-BI condition, the BI-ABC condition, as well as the visual span for the LVF and the RVF.

We observe a general trend for an effect of the information value of letter positions (with both hemifields combined), overall performance being higher when information value was greater at the beginning of the pseudoword (ABC-BI; $M = .75$, $SD = .030$) than at the end (BI-ABC; $M = .72$, $SD = .036$; $F(10,1) = 3.72$, $p = .08$, $\eta^2 = .271$). In the LVF, this trend is quite strong (ABC-BI: $M = .703$, $SD =$

.032; BI-ABC: $M = .663$, $SD = .037$; $F(1,10) = 4.94$, $p = .06$, $\eta^2 = .31$). We also obtain, for this hemifield, a significant interaction between information value and letter position ($F(4,40) = 23.40$, $p < .001$, $\eta^2 = .740$), lower information value increasing accuracy rates more for the last two letter positions than for the first two ($t(10) = 2.86$, $p < .02$, $d = 1.03$; mean difference of letter positions 1 and 2 = .153, mean difference of letter positions 4 and 5 = .278; see figure 5, left panel). For the RVF, the main effect of information value is clearly non-significant, but this factor interacts significantly with letter position ($F(4,40) = 11.31$, $p < .001$, $\eta^2 = .53$). Letters with lower information value increase accuracy rates in comparison to pseudowords with higher information value, both when they are located at the beginning of the pseudoword (BI-ABC; mean difference = .117, $SD = .095$; $t(10) = 4.09$, $p < .005$, $d = 3.45$) and at the end (ABC-BI; mean difference = .164, $SD = .039$; $t(10) = 4.17$, $p < .005$, $d = 4.18$; see figure 5, right panel). Thus, we find that information value impacts the identification of the pseudowords' letters to the same extent whether they are presented at the beginning or at the end of the word.

A salient feature of the data graphed in figure 5 is the drop in performance in both hemifields and for both information values for the 3rd letter position, which is significantly less accurately identified than the surrounding letters, both for the left (between the 2nd and 3rd letters, $t(10) = 6.73$, $p < .001$, $d = 6.72$, $M = .731$, $SD = .034$ and $M = .428$, $SD = .054$ respectively; between the 3rd and 4th letters, $t(10) = 5.22$, $p < .005$, $d = 4.00$, $M = .642$, $SD = .053$ for the 4th letter) and right visual fields (between the 2nd and 3rd letters, $t(10) = 10.23$, $p < .001$, $d = 5.29$; $M = .834$, $SD = .038$ and $M = .608$, $SD = .047$ respectively; between the 3rd and 4th letters, $t(10) = 7.70$, $p < .001$, $d = 3.35$; $M = .762$, $SD = .045$ for the 4th letter). This seems an obvious effect of visual crowding (see the *Visual span* section for more information on visual crowding).

When the most eccentric letter has higher information value, we find that the one in the LVF is identified more accurately than the one in the RVF ($t(10) = 2.39, p < .05, d = 2.36$). This is a surprising finding because reading is globally better in the RVF. If our lexical processing abilities depended only on low-level visual properties such as eccentricity and crowding, we should have found better performance for the most eccentric letter in the RVF in comparison to the left. Hence, our results indicate that these properties are not the only determinants for letter identification in lexical processing. They suggest the presence of another, higher-level mechanism that favours the identification of the first letter position in the LVF. Moreover, the first letter in the pseudoword (when information value is greater) is more accurately identified when it is presented to the LVF (in eccentricity) than when it is presented to the RVF (closer to the fovea; $t(10) = 2.396, p < .05, d = .86$), which emphasizes even further the notion that greater eccentricity does not impede performance for identifying the first letter position.

Finally, we distinguish what portion of our results can be attributed to higher-level factors (such a lexical-specific processing strategy or higher-level properties like information value) from that determined by lower-level factors by means of the visual span (see figure 5). In all cases, we find a very significant interaction between the task at hand (pseudoword-letter identification or visual span-letter identification) and letter position, indicating a form of lexicality effect on the identification of letters at specific positions (in the LVF, ABC-BI: $F(4,40) = 6.012, p < .001, \eta^2 = .375$ and BI-ABC : $F(4,40) = 18.691, p < .001, \eta^2 = .651$; in the RVF, ABC-BI: $F(4,40) = 15.448, p < .001, \eta^2 = .607$ and BI-ABC: $F(4,40) = 4.367, p = .005, \eta^2 = .304$).

More specifically, in the LVF, the second letter is more accurately identified in the pseudoword identification task than in the visual span task (in the ABC-BI condition: $t(10) = 2.57, p < .05, d = 2.90, M = .604, SD = .045$ and $M =$

.442, $SD = .065$ for the pseudoword and visual span tasks respectively; in the BI-ABC condition : $t(10) = 5.46, p < .001, d = 7.76, M = .858, SD = .039$ for the pseudoword task). However, in the ABC-BI condition of the pseudoword task, the third letter is less accurately identified than in the visual span task ($t(10) = 2.25, p = .05, d = 2.24, M = .404, SD = .062$ and $M = .545, SD = .064$ for the pseudoword and visual span tasks respectively; this difference is not significant in the BI-ABC condition; *ns*). When information value is higher at the end of the pseudoword, accuracy rates are lower for the 4th and 5th letters than for the corresponding positions in the visual span task (for the 4th letter: $t(10) = 2.58, p < .05, d = 2.79, M = .490, SD = .066$ and $M = .673, SD = .065$ for the pseudoword visual span tasks respectively; for the 5th letter: $t(10) = 2.46, p < .05, d = 3.21, M = .584, SD = .053$ and $M = .745, SD = .047$ for the pseudoword visual span tasks respectively).

In the RVF, accuracy for the first letter is comparable between tasks for both pseudoword conditions (ABC-BI and BI-ABC; *ns*). In the BI-ABC condition, a significantly better performance is observed for the second letter in the pseudoword task than in the visual span task ($t(10) = 3.35, p < .01, d = 3.56, M = .891, SD = .026$; $M = .758, SD = .046$ for the pseudoword and visual span tasks, respectively), and a lower performance is observed for the third letter ($t(10) = 2.95, p = .01, d = 2.49, M = .594, SD = .060$; $M = .721, SD = .040$ for the pseudoword and visual span tasks, respectively). The fourth and fifth letters are comparable between tasks (*ns*). Inversely, In the ABC-BI condition, accuracy for the second and third letters does not differ across tasks (*ns*). However, accuracy is greater for the fourth and fifth letters in the pseudoword task than in the visual span task (for the fourth letter: $t(10) = 4.39, p = .001, d = 4.95, M = .842, SD = .040$ and $M = .618, SD = .050$ for the pseudoword and visual span tasks respectively; for the fifth letter : $t(10) = 2.74, p < .05, d = 4.10, M = .957, SD = .016$ and $M = .788, SD = .056$ for the pseudoword and visual span tasks

respectively). Globally, these results reflect the symmetrical advantage for letters with less information value (the BI segment) in RVF displays in the pseudoword task. They suggest an advantage for identification of the first letter, but otherwise that performance remains relatively unaffected by reading strategy for the RVF (i.e. accuracy rates are similar for letters with higher information value, in our case the ABC segment and the visual span).

3.5 Discussion

We examined letter identification biases created by the information value of letter positions as well as eccentricity for pseudowords presented to the LVF and the RVF. We attempted to alter the reading strategy of participants by training them to read pseudowords forming a new lexicon in which the information value of letter positions was explicitly known and differed from that of the known lexicon. This aimed to dissociate the impacts of information value and eccentricity on word recognition as well as to document differences between the LVF and the RVF to this effect.

Our results indicate an important interaction between information value and letter position in both the LVF and the RVF. However, varying the information value of letter positions affects performance in the LVF and the RVF differently. Our findings in the LVF allow us to confirm that the LVF/right hemisphere disadvantage in reading studies does not stem from a lesser ability to identify the first letter position, often the most important for accurate word identification in our lexicon and the most eccentric letter position in the LVF. In fact, we find that even when identification of the first letter in a letter string is more difficult from a visual standpoint as well as from a content standpoint (i.e. it is more eccentric *and* the identity possibilities are greater), it is still identified as

accurately as the last letter, closest to the fovea. This resistance of the first letter in the LVF to the impact of eccentricity suggests that a high-level visual processing strategy specific to the visual identification of lexical stimuli (e.g. “focus on the first letter”) must be at play in the present findings. This strategy appears to take the form of a bias, which largely focuses processing resources on the first letter.

The hypothesis of the intervention of a lexical processing strategy is also supported by the observation that, across letter positions, overall performance in the LVF is better when information value is greater at the beginning of the word than when it is greater at the end, underlining better discrimination abilities for the first letters in the word in spite of eccentricity. The advantage we find for the identification of the first letter position over the last one is similar to what has been found by Heron (1957) and Efron, Yund & Nichols (1987), who proposed that the initial distribution of processing resources gives priority to the accurate identification of the first letter.

The present results also suggest the presence of a visual processing bias for letters that are otherwise put to a disadvantage because of their greater retinal eccentricity. For instance, in the RVF, the fifth letter, which is the most eccentric, is identified just as accurately as the first letter, which is closest to the fovea. Furthermore, in the ABC-BI condition, accuracy for the 1st letter in the LVF (the most eccentric letter) was greater than in the RVF (the least eccentric letter). Such observations suggest a compensatory visual processing strategy that involves a maximization of the resources dispatched onto the most eccentric letters, in an attempt to accurately recognize them. We have recently reported evidence also suggesting the application of such a compensatory process (Tadros, Dupuis-Roy, Fiset, Arguin & Gosselin, 2013). We found that for words presented to the LVF, the visual system uses higher spatial frequencies to identify longer, on average more eccentric words. We interpret this as an attempt to reduce visual crowding

for the more eccentric letters. This attentional compensation for eccentric letters may be advantageous or even adaptive since it favours the recognition of all the letters in a word, by focusing more resources on those with poorer acuity.

While the two high-level factors discussed so far (i.e. bias for first letter and bias for most eccentric letters) appear to be active for both visual hemifields, their total impact differs across hemifields. Thus, for the LVF, both factors act in favor of the first letter within the pseudowords. In contrast, for the RVF, the bias for the first letter favors one end of the pseudowords and the bias for the most eccentric letters favors the other end. This contrast between the hemifields is probably responsible for the following, somewhat surprising observation. We find that the most eccentric letter in the LVF (the 1st letter) was identified more accurately than the most eccentric letter in the RVF (the last letter), even though performance was on average greater in the RVF. Thus, our results also speak in favour of a more complex determinant for perceptual acuity of letters for word processing than a simpler low-level one comparable to the identification of letter in strings. This notion is supported by the following analysis of the results from the visual span task.

To measure the impact of top-down influences such as word-related properties on pseudoword identification, we compared performance in this task to our participants' visual span, a sensory bottleneck known to influence reading ability, particularly reading speed (Legge, Cheung, Yu, Chung, Lee, Owens, 2007). For trigrams presented to the RVF, our results are parsimoniously explained by a decrease in performance according to eccentricity and visual crowding, with a distinct advantage for the last letter, which is spared from the effect of crowding. We note however the presence of a visual span performance that is actually lower than that of the pseudoword letter identification task for the second most eccentric letter in both the LVF *and* the RVF when information value

was higher at that position (i.e. the second letter in the LVF and the fourth letter in the RVF). This performance boost for the second-most eccentric letters in the pseudoword task offers further support for the involvement of a specific lexical-processing strategy. It is possible that part of this performance difference is explained by the fact that the range of possible letters was slightly lower for the pseudoword than the visual span task (the pseudoword letters alternating between consonants and vowels rendered it a 1/5 or 1/21 possibility per letter, versus the visual span trigram letters which were random and always a 1/26 possibility). However, it is unlikely that the average 8.5% decrease in the number of alternatives would account for the totality of the effect, especially as performance in the LVF did not seem to be advantaged by this factor for other letter positions. This is particularly evident for letter positions 3-5 in the LVF BI-ABC condition, where performance was lower in the pseudoword than in the visual span task. By elimination then, the performance boost for the second-most eccentric letters in the pseudoword task constitutes further support for the involvement of a specific lexical-processing strategy.

Questions concerning the relation between attention and visual crowding as well as the possibility of an interaction between the two such as the one we see with our data have been brought forth by many investigators such as Pelli and Tillman (2008), who discuss the presence of an “uncrowded window”. Our ability to identify letters is particularly susceptible to visual crowding, especially in the visual periphery. Thus, it is possible that under free viewing reading conditions the third (middle) letter, which is significantly crowded in the pseudoword task, is more often accurately identified because it is located at the center of foveal vision and less sensitive to possible effects of visual crowding. We thus find attention and crowding to be separate and independent factors that interact to create perceptual limitations for word recognition. Furthermore, because reading with words presented to only one hemifield is quite rare in daily life, it is most likely that

reading strategies are developed for centrally presented stimuli. If this is the case, the lexical processing strategy we discuss is dispatched most usually onto a word that is at the center of viewing fixation, where crowding is lower and acuity higher, thus maximizing the possibility of accurately identifying more letters in the word.

Finally, it is most appropriate to underline the important link between our findings and the optimal viewing position. The optimal viewing position for a 5-letter word has been found to be on the second or third letter (Brysbaert & Nazir, 2005; O'Regan et al, 1984; Nazir, O'Regan & Jacobs, 1991). This position is thought to reflect the best balance between letter information value and visual acuity. We wonder whether this optimal viewing position window interacts with the proposed lexical processing strategies to maximize accurate word recognition. Attention seems to focus first and foremost on the first letter, and is invariant in strategy no matter the hemifield in which it is presented and the degree of acuity of the letter. This attentional positioning, in favour of the first letter, is seemingly resistant to overt attempts in manipulation of information value. This combination of attentional and viewing positions aiming to maximize letter identification ability within words is important behavioural evidence that we adapt our processing strategies to be as efficient as possible at both higher (attentional display) and lower (optimal viewing position) levels of processing.

In sum, our study aimed to dissociate the impact of information value and eccentricity on word recognition ability for the LVF and the RVF. Based on our results, we propose a lexical-specific processing strategy comprising two distinct mechanisms. The first is the application of an attentional left-to-right reading strategy favouring identification of the first letter position, independently of its visual eccentricity. The second is the use of a compensatory strategy for identifying letters that are more eccentric and thus more difficult to perceive.

3.6 Acknowledgements

The following financial support is acknowledged: grants from the Canadian Institutes of Health Research (CIHR) and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) to Martin Arguin and to Frédéric Gosselin. Karine Tadros is supported by a graduate scholarship from FQRNT.

3.7 References

- Blais, C., Fiset, D., Arguin, M., Jolicoeur, P., Bub, D., & Gosselin, F. (2009). Reading between eye saccades. *PloS one*, 4(7), e6448.
- Bradshaw, J. L., & Nettleton, N. C. (1983). *Human cerebral asymmetry*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, 10, 433-436.
- Bryden, M. P. (1986). On the possible dangers of using horizontal word displays in visual field studies. *Brain and cognition*, 5(3), 362-368.
- Bryden, M. P., Mondor, T. A., Loken, M., Ingleton, M. A., & Bergstrom, K. (1990). Locus of information in words and the right visual field effect. *Brain and cognition*, 14(1), 44-58.
- Brybaert, M., & Nazir, T. (2005). Visual constraints in written word recognition: evidence from the optimal viewing-position effect. *Journal of Research in Reading*, 28(3), 216-228.
- Brybaert, M., Vitu, F., & Schroyens, W. (1996). The right visual field advantage and the optimal viewing position effect: On the relation between foveal and parafoveal word recognition. *Neuropsychology; Neuropsychology*, 10(3), 385.
- Bub, D. N., & Lewine, J. (1988). Different modes of word recognition in the left and right visual fields. *Brain and language*, 33(1), 161-188.
- Carmon, A., Nachshon, I., & Starinsky, R. (1976). Developmental aspects of visual hemifield differences in perception of verbal material. *Brain and language*, 3(4), 463-469.
- Chiarello, C. (1988). Lateralization of lexical processes in the normal brain: A review of visual half-field research. *Contemporary reviews in neuropsychology*, 36-76
- Efron, R. (1990). *The decline and fall of hemispheric specialization*. Lawrence Erlbaum.

- Efron, R., Yund, E. W., & Nichols, D. R. (1987). Scanning the visual field without eye movements—A sex difference. *Neuropsychologia*, 25(4), 637-644.
- Faust, M., Kravetz, S., & Babkoff, H. (1993). Hemispheric Specialization or Reading Habits: Evidence from Lexical Decision Research with Hebrew Words and Sentences. *Brain and Language*, 44(3), 254-263.
- Hellige, J. B. (1993). *Hemispheric asymmetry: What's right and what's left*. Harvard University Press.
- Heron, W. (1957). Perception as a function of retinal locus and attention. *The American Journal of Psychology*, 38-48.
- Kirsner, K., & Schwartz, S. (1986). Words and hemifields: Do the hemispheres enjoy equal opportunity?. *Brain and Cognition*, 5(3), 354-361.
- Lavidor, M., & Ellis, A. W. (2002). Word length and orthographic neighborhood size effects in the left and right cerebral hemispheres. *Brain and Language*, 80(1), 45-62.
- 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(14), 1999.
- Legge, G. E., Cheung, S. H., Yu, D., Chung, S. T., Lee, H. W., & Owens, D. P. (2007). The case for the visual span as a sensory bottleneck in reading. *Journal of Vision*, 7(2).
- Melamed, F., & Zaidel, E. (1993). Language and task effects on lateralized word recognition. *Brain and Language*, 45, 70-70.
- Nazir, Tatjana A., J. Kevin O'Regan, and Arthur M. Jacobs. (1991). On words and their letters. *Bulletin of the Psychonomic Society; Bulletin of the Psychonomic Society*.
- New B., Pallier C., Ferrand L., Matos R. (2001) Une base de données lexicales du français contemporain sur internet: LEXIQUE, *L'Année Psychologique*, 101, 447-462.

- Orbach, J. (1967). Differential recognition of Hebrew and English words in right and left visual fields as a function of cerebral dominance and reading habits. *Neuropsychologia*, 5(2), 127-134.
- O'Regan, J. K. (1990). Eye movements and reading. *Reviews of oculomotor research*, 4, 395.
- O'Regan, J. K., Lévy-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(2), 250.
- Pelli, D.G. (1997). The Video Toolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10, 437-442.
- Pelli, D. G., & Tillman, K. A. (2008). The uncrowded window of object recognition. *Nature Neuroscience*, 11(10), 1129-1135.
- Tadros, K., Dupuis-Roy, N., Fiset, D., Arguin, M. & Gosselin, F. (2013). Reading laterally: The cerebral hemispheric use of spatial frequencies in visual word recognition. *Journal of Vision*, 13(1): 4, 1-12.
- Whitney, D. & Levi, D. (2011). Visual crowding: a fundamental limit on conscious perception and object recognition. *Trends in Cognitive Science*, 15(4), 160-168.

4 Discussion

4.1 Sommaire des résultats

4.1.1 Résultats principaux et conclusion, étude 1 : Les fréquences spatiales utilisées de façon optimale pour la lecture par chaque hémisphère cérébral.

Le but de la première étude était de révéler les patrons de fréquences spatiales utilisés par chaque hémisphère cérébral et de déterminer s'ils différaient entre eux. Pour ce faire, nous avons présenté des images de mots filtrées de façon aléatoire dans le domaine des fréquences spatiales à l'hémisphère gauche ou droit. Les fréquences spatiales les plus corrélées avec une reconnaissance exacte étaient alors déterminées pour chaque hémisphère et en fonction des longueurs de mots.

Nous trouvons d'abord que les fréquences spatiales utilisées de façon optimale par les hémisphères gauche et droit pour la reconnaissance de mots sont essentiellement les mêmes lorsque toutes les longueurs de mots sont confondues. De fait, les sommets des courbes d'échantillonnage fréquentiel se situent tous deux à approximativement 2 cycles / lettre. Ainsi, les mots présentés à l'hémisphère droit sont identifiés de façon exacte le plus souvent en utilisant la même information visuelle que les mots présentés à l'hémisphère gauche (tant que la connexion calleuse entre les deux hémisphères est possible, évidemment).

Néanmoins, nous découvrons tout de même d'importantes variations dans l'utilisation des fréquences spatiales entre les hémisphères. D'abord, même si les fréquences les plus utiles pour la reconnaissance de mots de façon générale sont essentiellement les mêmes, nous observons que l'hémisphère gauche requiert une moins grande quantité d'information que le droit pour atteindre un même niveau de performance, soulignant de meilleures habiletés de reconnaissance de mots

dans l'hémisphère gauche que dans le droit. Ainsi, l'hémisphère gauche utilise mieux l'information fréquentielle disponible, ce qui est cohérent avec l'observation comportementale bien connue que l'hémisphère droit est moins bon que le gauche pour la reconnaissance mots. Ensuite, nous observons un déplacement vers l'utilisation de fréquences spatiales plus hautes pour des mots plus longs présentés à l'hémisphère droit (en comparaison aux mots plus courts). Une telle différence dans l'utilisation des fréquences spatiales pour différentes longueurs de mots n'est pas retrouvée pour l'hémisphère gauche. Mentionnons toutefois que nous aurions pu nous attendre à obtenir un effet de longueur de mots, même dans l'hémisphère gauche, puisque ce dernier est connu pour être influencé par le contenu fréquentiel (Fiset et al., 2006). Enfin, nous trouvons que la longueur des mots influence également l'exactitude de leur reconnaissance, et que cet effet est beaucoup plus grand pour des mots présentés à l'hémisphère droit que pour ceux présentés à l'hémisphère gauche. Nos résultats offrent ainsi des preuves importantes que les hémisphères cérébraux peuvent en fait présenter des biais absolus dans le traitement des fréquences spatiales dans des circonstances spécifiques.

4.1.2 Résultats principaux et conclusion, étude 2 : L'impact de la valeur informative des lettres de mots sur les capacités d'identification de l'observateur dans chaque hémichamp visuel

La deuxième étude visait à dissocier les biais créés par la valeur informative des positions de lettres de ceux créés par l'excentricité des lettres pour des pseudomots présentés aux champs visuels gauche et droit ainsi qu'à documenter les différences entre les hémichamps à cet effet. Nous avons alors demandé aux participants d'identifier deux listes de pseudomots présentés en

champs divisés. Dans l'une, la valeur informative était plus grande au début des pseudomots, tandis que dans l'autre elle l'était à leur fin. Nous avons également comparé ces résultats à l'empan visuel des participants dans le but d'évaluer l'impact de facteurs de haut niveau sur leur performance.

Les résultats que nous avons obtenus argumentent clairement contre l'idée que la capacité d'identification de mots présentés à l'hémichamp visuel gauche est diminuée par la nécessité d'identifier les mots d'un lexique où la valeur informative est plus grande au début du mot. Au contraire, nous trouvons que ces premières lettres font partie des lettres les plus souvent perçues correctement dans l'hémichamp visuel gauche, même si elles y sont les plus excentriques.

De fait, nous trouvons que la lettre la plus excentrique et contenant plus de valeur informative dans l'hémichamp visuel gauche est perçue tout aussi correctement que la lettre la moins excentrique. De plus, la performance est meilleure dans cet hémichamp lorsque la valeur informative est plus grande au début du mot que lorsqu'elle est plus grande à la fin, soulignant de meilleures habiletés de discrimination pour les premières lettres du mot malgré leur excentricité. En comparant la capacité des participants à identifier des pseudomots et des trigrammes (l'empan visuel), nous observons de moins bonnes performances pour les trois dernières lettres des pseudomots (lorsque la valeur informative était plus élevée) que pour les lettres correspondantes de l'empan visuel, et ce, même si les possibilités de choix de lettres étaient moindres pour les pseudomots. Ceci indique ainsi que la stratégie spécifique au traitement des mots en tant que tel désavantage l'identification des dernières lettres d'un mot, possiblement pour maximiser la distribution des ressources sur ses premières lettres.

Dans l'hémichamp visuel droit, nous trouvons que la reconnaissance de lettres est meilleure là où la valeur informative est plus basse, indépendamment de si ces lettres se situent au début ou à la fin des mots. Nous remarquons également

que nos résultats sont expliqués de façon parcimonieuse par l'empan et l'encombrement visuel, avec un avantage distinct pour la dernière lettre, épargnée de l'effet d'encombrement. Ainsi, la performance en fonction de la position des lettres à l'intérieur du mot dans l'hémichamp visuel droit semble davantage influencé par des facteurs perceptifs de bas niveau que par la valeur informative des lettres, puisque les résultats des participants suivent globalement le même patron de réponse que celui de l'empan visuel, avec l'exception de la 4^e lettre.

En effet, nous trouvons un empan visuel brut plus faible pour la 2^e lettre la plus excentrique dans les hémichamps gauche et droit (i.e. la 2^e lettre d'un pseudomot dans l'hémichamp visuel gauche et la 4^e lettre d'un pseudomot dans l'hémichamp visuel droit) que celui reflété par la performance des participants dans la tâche d'identification des lettres de pseudo-mots lorsque la valeur informative était plus élevée dans cette position. Puisque les lettres dans cette condition ne correspondent pas à celles d'une combinaison connue, le participant doit absolument être capable de l'identifier isolément. Ceci suggère alors que l'identification de ces lettres de pseudomots est avantagée par l'utilisation d'une stratégie de traitement spécifique au lexique plutôt que de la stratégie utilisée pour l'identification des lettres de trigrammes.

4.2 Mise en relation des résultats des deux études et implications théoriques

Dans les sections qui suivent, nous mettons en relation les résultats issus de nos deux études et discutons des implications théoriques qui en découlent. Bien que nous ayons révélé d'importantes différences entre les hémisphères cérébraux (lors de présentation en champs divisés), notamment une diminution du taux de bonnes réponses en fonction de l'augmentation de la longueur des mots, nous ne

pouvions exclure la possibilité que d'autres facteurs aient influencé les biais retrouvés. Ceci a donc été investigué dans le cadre de la deuxième étude. Nous abordons ici le possible impact de la valeur informative des différentes positions de lettres, de l'excentricité, de l'empan ainsi que de l'encombrement visuel sur les biais hémisphériques retrouvés. Nous discutons également du déploiement d'une fenêtre attentionnelle et d'une stratégie de traitement propre à l'identification des mots ainsi que de l'utilisation d'une stratégie compensatoire lors de l'identification de mots dans des conditions de visionnement sous-optimales.

4.2.1 Impact de la valeur informative et de l'excentricité des lettres lors d'échantillonnage fréquentiel de mots présentés en champs divisés

À la suite des résultats obtenus dans notre première étude, nous avons soulevé la possibilité que l'excentricité des différentes positions de lettres puisse interagir avec leur valeur informative pour nuire davantage à l'identification des lettres les plus discriminatives du mot dans notre tâche. Ceci handicaperait l'hémichamp visuel gauche/hémisphère droit plus que l'hémichamp visuel droit/hémisphère gauche, puisque les premières lettres du mot - les plus excentriques dans l'hémichamp visuel gauche et les moins excentriques dans l'hémichamp visuel droit - ont en moyenne une valeur informative plus grande que les dernières lettres (Blais et al, 2009), les rendant par le fait même plus importantes pour l'identification du mot (voir la section 1.3.4 dans l'introduction pour plus de détails à ce sujet).

Toutefois, notre deuxième étude montre bien que la valeur informative des lettres ne semble pas être la source des variations de performance des participants. De fait, nous trouvons que les lettres les plus excentriques sont mieux identifiées, même dans l'hémichamp visuel gauche/hémisphère droit, peu importe leur valeur

informative. Nous observons aussi que le taux de bonnes réponses est meilleur pour les lettres les plus informatives lorsqu'elles se situent au début du mot que lorsqu'elles se situent à la fin (et donc plus près de la fovéa), soulignant encore une fois de meilleures habiletés de discrimination pour les premières lettres du mot malgré leur excentricité.

De plus, la première lettre est mieux identifiée lorsqu'elle est présentée à l'hémichamp gauche, de façon plus excentrique, que lorsqu'elle est présentée à l'hémichamp droit, près de la fovéa. Ainsi, il est possible de conclure que les variations de performance observées lors de l'échantillonnage fréquentiel des mots ne résultent pas d'une baisse de capacités pour l'identification de cette première lettre et que l'excentricité de l'extrémité des mots présentés à l'hémichamp gauche n'accuse pas une diminution d'acuité visuelle suffisante dans le cadre de nos expériences pour expliquer les variations de performance entre les différentes longueurs de mots dans l'hémichamp gauche ni entre les hémichamps.

Il demeure possible que l'effort investi dans l'identification de cette première lettre augmente avec son excentricité et que cela ait nuit à la disponibilité des ressources attentionnelles et perceptives (tel qu'une diminution causée par l'estompement de l'image rémanente, par exemple) pour l'identification des lettres subséquentes dans le mot, malgré qu'elles soient plus près du centre de fixation visuelle et qu'elles disposent d'une meilleure acuité. Les difficultés rencontrées pour les mots présentés à l'hémichamp visuel gauche semblent alors avoir une autre source, possiblement d'autres facteurs de haut niveau tel que des limites sur le plan du déploiement attentionnel et/ou d'autres facteurs de bas niveau tel qu'un plus grand impact de l'encombrement visuel sur les performances en reconnaissance de mots.

4.2.2 Utilisation d'une stratégie compensatoire lors de l'identification de mots

À la suite des résultats obtenus, nous sommes portés à croire que le système perceptif utilise des stratégies compensatoires pour maximiser la possibilité d'identification d'un mot. De fait, nous trouvons un décalage vers l'utilisation de fréquences spatiales plus hautes pour des mots plus longs (et donc en moyenne plus excentriques) présentés à l'hémisphère droit. Ce décalage souligne un avantage pour le traitement visuel de stimuli qui devraient être plus difficiles à percevoir. Ceci suggère que le système visuel peut tenter de compenser pour de l'information visuelle de moins bonne qualité en excentricité en alternant sa stratégie de traitement dans le but d'accommoder ce changement. Ce biais est au premier abord contrintuitif, puisque les écrits décrivent de façon générale un biais dans l'hémisphère droit vers de plus basses fréquences spatiales. Il est probable que dans ces circonstances, des fréquences spatiales plus élevées permettent une discrimination plus fine des différentes composantes des lettres à l'intérieur du mot, augmentant ainsi la possibilité que l'on identifie correctement les lettres pour lesquelles nous avons une plus faible acuité (dans notre cas les lettres excentriques, et sujettes par le fait même à plus d'encombrement visuel) en comparaison aux fréquences spatiales plus basses. Ce décalage dans l'utilisation des fréquences spatiales que nous observons dans nos données peut ainsi refléter la tentative de l'hémisphère droit de diminuer l'impact de l'encombrement visuel.

4.2.3 Impact de l'encombrement visuel lors de présentation en champs divisés

Il a été suggéré que le niveau d'encombrement visuel observé en excentricité est plus élevé dans l'hémichamp visuel gauche que dans le droit lors

du traitement des lettres (Legge et al., 2007), signalant ainsi que l'hémisphère droit est sujet à plus d'encombrement visuel que le gauche. Un lien entre l'encombrement visuel et la sélection des fréquences spatiales a été postulé par Chung et Tjan (2007), qui ont trouvé un déplacement de la sensibilité de l'observateur vers des fréquences spatiales plus élevées pour l'identification de lettres encombrées. De fait, leurs données montrent que le déplacement de la sensibilité aux fréquences spatiales pour les lettres les plus encombrées est de 0,17 octaves à la fovéa et 0,19 octaves à 5 degrés d'excentricité. Ceci a été trouvé chez les observateurs humains, mais pas chez un observateur idéal (qui a été limité avec des courbes de sensibilité au contraste mesurées à la fovéa et à 5 degrés d'excentricité). Puisque l'observateur idéal utilise par définition la stratégie optimale pour effectuer la tâche, leurs résultats suggèrent que le système visuel humain effectue un déplacement de sensibilité aux fréquences spatiales sous-optimal lorsqu'il identifie des lettres entourées de près par d'autres lettres. Ce déplacement est en accord avec celui observé dans nos données, compte tenu du fait que les lettres des mots plus longs (donc plus excentriques) dans l'hémichamp visuel gauche, sont sujettes à un plus haut niveau d'encombrement visuel que ceux dans l'hémichamp visuel droit.

Il peut être avantageux au système visuel d'utiliser des plus hautes fréquences spatiales puisqu'elles permettront de mieux discriminer les lettres difficiles à percevoir, même si cela ralentit la cadence de lecture. En effet, dans des conditions de lecture normale, le système visuel ne mise pas nécessairement sur l'optimisation de sa performance mais plutôt sur l'identification juste du mot, même si cela se fait au détriment de la vitesse du traitement de l'information. Toutefois, dans nos paradigmes de recherche, où les stimuli sont présentés pendant une période de temps très limitée, cette stratégie devient moins efficace, comme en témoignent les plus faibles taux de bonnes réponses pour les mots plus longs, et ce malgré une bonne capacité d'identification pour les lettres les plus excentriques

dans chaque hémichamp (et plus particulièrement dans l'hémichamp visuel gauche).

4.2.4 Déploiement d'une stratégie de traitement spécifique à l'identification des mots

La deuxième étude nous a permis de constater que chaque mot présenté semble être traité en tant qu'entité pour lequel le traitement se fait selon une même stratégie en priorisant la 1^{re} lettre, peu importe l'hémichamp où le mot est présenté et l'acuité visuelle des différentes lettres. Ceci est en accord avec l'étude de Efron, Yund et Nichols (1987), qui proposent que les processus attentionnels déploient l'attention d'abord à l'hémichamp visuel droit de gauche à droite, et ensuite à l'hémichamp visuel gauche, encore une fois de gauche à droite. Dans des conditions de visionnement sous-optimales comme les nôtres, il y aurait une perte d'information pour les mots présentés à l'hémisphère droit lorsque les processus attentionnels sont distribués dans un deuxième temps vers cet hémisphère. Cette perte peut par exemple être due à l'estompement de l'image rémanente, et/ou encore à du « bruit » causé par la lecture des premières lettres et qui nuirait à la reconnaissance des lettres subséquentes. Une telle perte dans le signal est observable dans notre première étude, où nous trouvons que l'hémisphère droit doit avoir accès à une plus grande quantité d'information visuelle que le gauche pour reconnaître les mots correctement. De plus, une stratégie attentionnelle de lecture de gauche à droite est clairement observable dans la deuxième étude, où l'identification des premières lettres est meilleure que celle de lettres subséquentes, tant dans l'hémichamp visuel droit que dans le gauche. Ainsi, le traitement visuel des mots semble nécessiter une allocation des ressources attentionnelles et perceptives différente de celle utilisée par le système visuel lors de l'identification de stimuli de plus bas niveau.

4.3 Fréquences spatiales, spécialisation cérébrale et dyslexie

De nombreux chercheurs se sont penchés sur le lien possible entre les fréquences spatiales et la spécialisation de certaines fonctions cérébrales lors du développement cognitif. La lecture étant au centre de cette thèse, nous en profitons pour discuter du lien entre les fréquences spatiales, la spécialisation cérébrale et la dyslexie, plus spécifiquement la dyslexie acquise, trouble de la lecture survenant suite à une lésion cérébrale.

4.3.1 Fréquences spatiales et spécialisation cérébrale

L'étude des fréquences spatiales par les hémisphères cérébraux de façon séparée se voit d'autant plus intéressante lorsqu'on considère que les biais hémisphériques lors du traitement des fréquences spatiales pourraient expliquer plusieurs des spécialisations fonctionnelles du cerveau. Des exemples de ce type de spécialisation sont : une région dans le gyrus fusiforme droit spécialisée dans le traitement des stimuli faciaux (*fusiform face area* ou FFA; Kanwisher, McDermott et Chun, 1997), une région débutant au niveau du cortex occipito-latéral et s'étendant aux régions temporo-postérieures associées à la reconnaissance d'objets (aussi connu sous le nom de complexe latéro-occipital ou LOC; Grill-Spector, Kourtzi et Kanwisher, 2001; Grill-Spector, Kushnir, Edelman, Itzhak et Malach, 1998; Murtha, Chertkow, Beauregard et Evans, 1999; Kourtzi et Kanwisher, 2000; Doniger, Foxe, Murray et al, 2000) et la jonction occipito-temporale latérale gauche, localisée dans la partie postérieure du gyrus fusiforme et reconnue pour le traitement de l'information visuelle écrite. Ces régions semblent activées par des propriétés qui sont spécifiques aux stimuli traités et qui sont nécessaires pour une reconnaissance juste de ces stimuli. De façon

intéressante, les régions biaisées pour le traitement de stimuli particuliers peuvent commencer à être activées par d'autres types de stimuli sous certaines circonstances (comme l'activation de la FFA après un entraînement spécifique pour l'identification d'oiseaux ou de voitures chez des experts; Gauthier, Skudlarski, Gore et al, 2000). L'identification de ces stimuli, bien que différents, nécessite des habiletés communes. De fait, les experts en identification de visages, d'oiseaux ou de voitures doivent tous être capables de différencier les détails fins d'objets qui se ressemblent. Ceci nécessite le traitement exact d'un ensemble similaire de relativement hautes fréquences spatiales. Il est possible que ces stimuli soient tous traités par la FFA chez des experts simplement parce que celle-ci traite cet ensemble de fréquences spatiales de façon efficace. La spécialisation de régions cérébrales spécifiques pour la reconnaissance d'un type de stimulus spécifique pourrait alors suivre un biais de cette région pour le traitement d'une étendue de fréquences spatiales idéale pour la tâche demandée. Goffaux, Gauthier et Rossion (2003) ont trouvé, à l'aide de potentiels évoqués, une différence dans l'activation cérébrale habituellement associée à la reconnaissance des visages en fonction des fréquences spatiales présentées. De fait, à l'aide du potentiel évoqué N170, plus grand lors de la perception de visages que d'autres objets, ils ont observé une activation comparable pour la présentation de visages non-filtrés que pour ceux contenant uniquement des basses fréquences spatiales. La différence entre les N170 pour les visages et les objets disparaissait toutefois lorsque les images étaient présentées à l'aide d'un filtre passe-haut, suggérant la possibilité que la région activée soit davantage sensible aux fréquences spatiales présentées (dans ce cas les basses fréquences spatiales) qu'à la nature du stimulus. Ainsi, il est possible que ces régions ne soient pas tant biaisées vers la *tâche* en cours que vers les *fréquences spatiales* traitées.

4.3.2 Fréquences spatiales et dyslexie

Chez des lecteurs auparavant normaux, la perception visuelle des mots peut être atteinte suite à une lésion de la région ventrale du cortex occipito-temporal de l'hémisphère gauche, de la substance blanche sous-jacente et souvent des connexions calleuses également (pour les personnes dont le langage est représenté à gauche; Cohen, Martinaud, Lemer et al, 2003). Cette lésion cause un trouble de la lecture nommé dyslexie lettre-par-lettre (ou dyslexie LPL ; aussi connue sous le nom d'alexie pure ; Binder and Mohr, 1992). Tandis qu'un lecteur normal identifie un mot avec une latence relativement invariante pour les mots d'environ 3 à 6 lettres (Weekes, 1997; Lavidor et Ellis, 2002), le temps qu'une personne atteinte d'une dyslexie LPL prend pour lire un mot augmente proportionnellement au nombre de lettres qu'il contient (souvent plus de 300 ms par lettre ; ceci a été décrit en premier par Déjerine en 1892 ; Patterson et Kay, 1982 ; Warrington et Shallice, 1980). Les dyslexiques LPL ont typiquement une production et une compréhension du langage oral entièrement préservées. De plus, lorsqu'ils n'ont pas d'atteintes motrices, ils peuvent écrire normalement soit de façon spontanée ou lors d'une dictée (Cohen, Martinaud, Lemer et al, 2003). Une explication possible pour la difficulté d'encodage visuel des lettres chez le dyslexique LPL est que l'information visuelle qui lui est accessible est limitée en termes de fréquences spatiales. Il a été montré que des individus présentant une dyslexie développementale ont une sensibilité réduite à certaines fréquences spatiales et que cette réduction tend à être plus grande dans l'étendue basse à moyenne des fréquences spatiales (i.e. entre 2 et 8 cycles par degré d'angle visuel ; Lovegrove, Bowling, Badcock et Blackwood, 1980 ; Martin et Lovegrove, 1988 ; voir Skottun, 2000 pour une revue de la littérature à ce sujet). De récents travaux par Fiset et ses collaborateurs (Fiset, Gosselin, Blais et Arguin, 2006 ; Fiset, Arguin, Bub, Humphreys et Riddoch, 2006) ont suggéré que la dyslexie LPL est due au fait que ces lecteurs n'utilisent pas les mêmes fréquences spatiales que les lecteurs

normaux. Pour démontrer ceci, ils ont tenté d'induire des caractéristiques propres à la dyslexie LPL chez des lecteurs normaux en filtrant les mots présentés en termes de fréquences spatiales. Ils ont d'abord présenté des images de mots filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas (Fiset, Arguin et Fiset, 2006), puis à l'aide d'un filtre passe-haut (Fiset, Gosselin, Blais et Arguin, 2006). Des effets de longueur de mots et des taux d'erreurs similaires à ceux observés chez les lecteurs dyslexiques LPL ont été obtenus, indiquant alors que les fréquences spatiales présentées peuvent jouer un rôle déterminant dans l'effet de longueur de mot retrouvé chez ces lecteurs. Ils émettent ainsi l'hypothèse que les lecteurs dyslexiques LPL utiliseraient ces basses et hautes fréquences pour la reconnaissance de mots. Ces derniers tenteraient d'abord d'identifier le mot à l'aide des basses fréquences spatiales, puisqu'elles permettent la perception de plusieurs lettres à la fois, et consiste en une stratégie qui s'apparente davantage à celle qu'ils utilisaient avant leur lésion cérébrale lors de la lecture normale. Si l'information perçue lors du traitement est insuffisante pour permettre une identification explicite du mot, comme elle l'est habituellement, un traitement sériel des lettres reposant sur les hautes fréquences spatiales deviendrait nécessaire pour identifier le mot. Ainsi, un effet de longueur de mot résultant de ce traitement sériel serait observé.

Donc les lecteurs dyslexiques LPL, n'ayant pas accès aux fréquences spatiales utilisées de façon optimale par les lecteurs normaux, utiliseraient des fréquences plus basses pour tenter percevoir le mot entier et des fréquences plus hautes pour discriminer les lettres entre elles. Cette théorie est fortement appuyée par les biais de sensibilité aux fréquences spatiales des hémisphères cérébraux. De fait, Fiset, Gosselin, Blais et Arguin (2006) vont jusqu'à proposer que la lésion cérébrale caractéristique de la dyslexie LPL se situerait exactement où les fréquences spatiales moyennes les plus utiles pour identifier les mots sont traitées et épargnerait la région où le traitement des hautes fréquences spatiales a lieu. Ainsi, le traitement sériel des lettres du mot se produirait dans la région de

l'hémisphère gauche qui a été épargnée par la lésion et qui est plus sensible aux hautes fréquences spatiales.

5 Conclusion

Les études constituant cette thèse ont permis d'élucider plusieurs questions au sujet de l'utilisation de l'information visuelle en lecture. D'abord, sur le plan des fréquences spatiales, on a découvert que le spectre des fréquences spatiales utilisées lors de la reconnaissance de mot ne semble pas globalement varier entre les hémisphères, malgré une plus grande efficacité dans l'hémisphère gauche pour l'utilisation des fréquences présentées. Toutefois, une variation surprenante est retrouvée dans l'hémisphère droit vers de plus hautes fréquences spatiales pour des mots plus longs (vs. plus courts). Ceci semble être une tentative de l'hémisphère droit d'utiliser une stratégie compensatoire pour des mots plus longs et plus excentriques, possiblement dans le but de réduire l'impact de l'encombrement visuel, plus important en excentricité dans l'hémichamp visuel gauche. Ensuite, nous trouvons que les variations de performance observées ne semblent pas attribuables à l'impact d'une inégalité créée par la présentation en champs divisés, particulièrement en ce qui concerne la valeur informative des différentes positions de lettres des mots. Enfin, nos résultats suggèrent une stratégie de traitement spécifique à la lecture privilégiant l'identification exacte des premières lettres du mot. En somme, ces résultats nous renseignent sur les biais fréquentiels hémisphériques en lecture ainsi que de la portée des études sur la reconnaissance de mots en champs divisés, en plus de souligner l'importance de facteurs de plus haut niveau, tel que les stratégies de traitement de l'information, sur le déploiement des ressources attentionnelles et les habiletés de discrimination visuelle.

Bibliographie

- Binder, J. R., & Mohr, J. P. (1992). The topography of callosal reading pathways a case-control analysis. *Brain, 115*(6), 1807-1826.
- Blais, C., Fiset, D., Arguin, M., Jolicoeur, P., Bub, D., & Gosselin, F. (2009). Reading between eye saccades. *PloS one, 4*(7), e6448.
- Blake, R., & Mills, J. (1979). Pattern and flicker detection examined in terms of the nasal-temporal division of the retina. *Perception, 8*(5), 549.
- Borsting, E., Ridder, W. H., Dudeck, K., Kelley, C., Matsui, L., & Motoyama, J. (1996). The presence of a magnocellular defect depends on the type of dyslexia. *Vision research, 36*(7), 1047-1053.
- Bradshaw, J. L., & Nettleton, N. C. (1983). *Human Cerebral Asymmetry*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Bryden, M. P. (1986). On the possible dangers of using horizontal word displays in visual field studies. *Brain and Cognition, 5*(3), 362-368.
- Bryden, M. P., Mondor, T. A., Loken, M., Ingleton, M. A., & Bergstrom, K. (1990). Locus of information in words and the right visual field effect. *Brain and Cognition, 14*(1), 44-58.
- Brysbaert, M., Vitu, F., & Schroyens, W. (1996). The right visual field advantage and the optimal viewing position effect: On the relation between foveal and parafoveal word recognition. *Neuropsychology, 10*(3), 385.
- Campbell, F. W., & Green, D. G. (1965). Optical and retinal factors affecting visual resolution. *The Journal of Physiology, 181*(3), 576.
- Carmon, A., Nachshon, I., & Starinsky, R. (1976). Developmental aspects of visual hemifield differences in perception of verbal material. *Brain and Language, 3*(4), 463-469.
- Chiarello, C. (1988). Lateralization of lexical processes in the normal brain: A review of visual half-field research. *Contemporary reviews in neuropsychology, 36-76*.

- Chiarello, C., Senehi, J., & Soulier, M. (1986). Viewing conditions and hemisphere asymmetry for the lexical decision. *Neuropsychologia*, *24*(4), 521-529.
- Christman, S. D., Kitterle, F. L., & Niebauer, C. L. (1997). Hemispheric asymmetries in the identification of band-pass filtered letters. *Psychonomic Bulletin & Review*, *4*(2), 277-284.
- Chung, S. T., Legge, G. E., & Tjan, B. S. (2002). Spatial-frequency characteristics of letter identification in central and peripheral vision. *Vision Research*, *42*(18), 2137-2152.
- Chung, S.T.L. & Tjan, B.S. (2007). Shift in spatial scale in identifying crowded letters, *Vision Research*, *47*, 437–451.
- Cohen, L., Martinaud, O., Lemer, C., Lehericy, S., Samson, Y., Obadia, M., ... & Dehaene, S. (2003). Visual word recognition in the left and right hemispheres: anatomical and functional correlates of peripheral alexias. *Cerebral Cortex*, *13*(12), 1313-1333.
- Cornelissen, P. L. (1993). Fixation, contrast sensitivity and children's reading. In S. F. Wright & R. Groner (Eds.), *Facets of dyslexia and its remediation*, 139-162. Amsterdam: Elsevier
- Dejerine, J. J. (1892). Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale.
- Demb, J. B., Boynton, G. M., Best, M., & Heeger, D. J. (1998). Psychophysical evidence for a magnocellular pathway deficit in dyslexia. *Vision Research Oxford*, *38*, 1555-1560.
- Doniger, G. M., Foxe, J. J., Murray, M. M., Higgins, B. A., Snodgrass, J. G., Schroeder, C. E., & Javitt, D. C. (2000). Activation timecourse of ventral visual stream object-recognition areas: high density electrical mapping of perceptual closure processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*(4), 615-621.
- Efron, R. (1990). *The decline and fall of hemispheric specialization*. Lawrence Erlbaum.

- Efron, R., Yund, E. W., & Nichols, D. R. (1987). Scanning the visual field without eye movements—A sex difference. *Neuropsychologia*, *25*(4), 637-644.
- Evans, B. J. W., Drasdo, N., & Richards, I. L. (1993). Linking the sensory and motor visual correlates of dyslexia. In S. F. Wright & R. Groner (Eds.), *Facets of dyslexia and its remediation*, 179-191. Amsterdam: Elsevier, North-Holland.
- Faust, M., Kravetz, S., & Babkoff, H. (1993). Hemisphericity and Top-Down Processing of Language. *Brain and Language*, *44*(1), 1-18.
- Fendrich, R., & Gazzaniga, M. (1990). Hemispheric processing of spatial frequencies in two commissurotomy patients. *Neuropsychologia*, *28*(7), 657-663.
- Fiorentini, A., & Berardi, N. (1984). Right-hemisphere superiority in the discrimination of spatial phase. *Perception*, *13*(6), 695-708.
- Fiset D., Arguin M., Bub D., Humphreys GW., Riddoch M.J. (2005). How to make the word-length effect disappear in letter-by-letter dyslexia. *Psychological Science*, *16*, 535–541.
- Fiset, S., Arguin, M., & Fiset, D. (2006). An attempt to simulate letter-by-letter dyslexia in normal readers. *Brain and Language*, *98*(3), 251-263.
- Fiset, D., Gosselin, F., Blais, C., & Arguin, M. (2006). Inducing letter-by-letter dyslexia in normal readers. *Journal of cognitive neuroscience*, *18*(9), 1466-1476.
- Gauthier, I., Skudlarski, P., Gore, J. C., & Anderson, A. W. (2000). Expertise for cars and birds recruits brain areas involved in face recognition. *Nature Neuroscience*, *3*(2), 191.
- Goffaux, V., Gauthier, I., & Rossion, B. (2003). Spatial scale contribution to early visual differences between face and object processing. *Cognitive Brain Research*, *16*(3), 416-424.
- Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2001). Bubbles: a technique to reveal the use of information in recognition tasks. *Vision Research*, *41*(17), 2261-2271.

- Grill-Spector, K., Kourtzi, Z., & Kanwisher, N. (2001). The lateral occipital complex and its role in object recognition. *Vision Research*, *41*(10-11), 1409-1422.
- Grill-Spector, K., Kushnir, T., Edelman, S., Itzhak, Y., & Malach, R. (1998). Cue-invariant activation in object-related areas of the human occipital lobe. *Neuron Cambridge*, *21*, 191-202.
- Hardyck, C. (1991, March). Shadow and substance: Attentional irrelevancies and perceptual constraints in hemispheric processing of language stimuli. In *Cerebral laterality: Theory and research. The Toledo Symposium* (pp. 133-153).
- Hellige, J. B. (1993). *Hemispheric asymmetry: What's right and what's left*. Harvard University Press.
- Heron, W. (1957). Perception as a function of retinal locus and attention. *The American Journal of Psychology*, 38-48.
- Howell, W., & Kraft, C. (1960). *Size, blur and contrast as variables affecting the legibility of alphanumeric symbols on radar-type displays. OH: Wright-Patterson AFB. WADC Technical Report 59-536*.
- Hughes, H. C., Fendrich, R., & Reuter-Lorenz, P. A. (1990). Global versus local processing in the absence of low spatial frequencies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *2*(3), 272-282.
- Ivry, R. B., & Robertson, L. C. (1998). *The two sides of perception* MIT Press. Cambridge, MA.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *The Journal of Neuroscience*, *17*(11), 4302-4311.
- Kirsner, K., & Schwartz, S. (1986). Words and hemifields: Do the hemispheres enjoy equal opportunity? *Brain and Cognition*, *5*(3), 354-361.
- Kitterle, F. L., Christman, S., & Hellige, J. B. (1990). Hemispheric differences are found in the identification, but not the detection, of low versus high spatial frequencies. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *48*(4), 297-306.

- Kitterle, F. L., & Kaye, R. S. (1985). Hemispheric symmetry in contrast and orientation sensitivity. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 37(5), 391-396.
- Kourtzi, Z., & Kanwisher, N. (2000). Cortical regions involved in perceiving object shape. *The Journal of Neuroscience*, 20(9), 3310-3318.
- Lamb, M. R., & Yund, E. W. (1996). Spatial frequency and attention: Effects of level-, target-, and location-repetition on the processing of global and local forms. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 58(3), 363-373.
- Lavidor, M., & Ellis, A. W. (2002). Word length and orthographic neighborhood size effects in the left and right cerebral hemispheres. *Brain and language*, 80(1), 45-62.
- Legge, G. E., Cheung, S. H., Yu, D., Chung, S. T., Lee, H. W., & Owens, D. P. (2007). The case for the visual span as a sensory bottleneck in reading. *Journal of Vision*, 7(2).
- Legge, G. E., Rubin, G. S., & Luebker, A. (1987). Psychophysics of reading—V. The role of contrast in normal vision. *Vision Research*, 27(7), 1165-1177.
- Levi, D. M. (2008). Crowding—An essential bottleneck for object recognition: A mini-review. *Vision research*, 48(5), 635.
- Lovegrove, W. J., Bowling, A., Badcock, D., & Blackwood, M. (1980). Specific reading disability: Differences in contrast sensitivity as a function of spatial frequency. *Science*, 210, 439-440.
- Lovegrove, W. J., Martin, F., Bowling, A., Blackwood, M., Badcock, D., & Paxton, S. (1982). Contrast sensitivity functions and specific reading disability. *Neuropsychologia*, 20, 309-315.
- Majaj, N. J., Pelli, D. G., Kurshan, P., & Palomares, M. (2002). The role of spatial frequency channels in letter identification. *Vision Research*, 42(9), 1165-1184.
- Martin, M. (1979). Hemispheric specialization for local and global processing. *Neuropsychologia*, 17, 33-40.

- Martin, F., & Lovegrove, W. J. (1988). Uniform-field flicker masking in control and specifically-disabled readers. *Perception, 17*(2), 203.
- McConkie, G. W., & Rayner, K. (1976). Asymmetry of the perceptual span in reading. *Bulletin of the Psychonomic Society*.
- Melamed, F., & Zaidel, E. (1993). Language and task effects on lateralized word recognition. *Brain and Language, 45*, 70-70.
- Murtha, S., Chertkow, H., Beaugard, M., & Evans, A. (1999). The neural substrate of picture naming. *Journal of Cognitive Neuroscience, 11*(4), 399-423.
- Orbach, J. (1967). Differential recognition of Hebrew and English words in right and left visual fields as a function of cerebral dominance and reading habits. *Neuropsychologia, 5*(2), 127-134.
- O'Regan, J. K. (1990). Eye movements and reading. *Reviews of Oculomotor Research, 4*, 395.
- O'Regan, J. K. (1991). Understanding visual search and reading using the concept of stimulus "grain". *IPO Annual Progress Reports 26*, 96-108.
- Patching, G. R., & Jordan, T. R. (2005). Assessing the role of different spatial frequencies in word perception by good and poor readers. *Memory and Cognition, 33*(6), 961-971.
- Patterson, K., & Kay, J. (1982). Letter-by-letter reading: Psychological descriptions of a neurological syndrome. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 34*(3), 411-441.
- Peterzell, D. H. (1991). On the nonrelation between spatial frequency and cerebral hemispheric competence. *Brain and Cognition, 15*(1), 62-68.
- Rao, S.M., Rourke, D., & Whitman, R. D. (1981). Spatio-temporal discrimination of frequency in the right and left visual fields: a preliminary report. *Perceptual and Motor Skills, 53*(1), 311-316.
- Robertson, L. C. (1996). Attentional persistence for features of hierarchical patterns. *Journal of Experimental Psychology: General; Journal of Experimental Psychology: General, 125*(3), 227.

- Sergent, J. (1982). The cerebral balance of power: Confrontation or cooperation? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8(2), 253.
- Sergent, J. (1983). The effects of sensory limitations on hemispheric processing. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 37(3), 345.
- Shulman, G. L., Sullivan, M. A., Gish, K., & Sakoda, W. J. (1986). The role of spatial-frequency channels in the perception of local and global structure. *Perception*, 15(3), 259-273.
- Skottun, B. C. (2000). The magnocellular deficit theory of dyslexia: the evidence from contrast sensitivity. *Vision research*, 40(1), 111-127.
- Solomon, J. A., & Pelli, D. G. (1994). The visual filter mediating letter identification. *Nature*, 369(6479), 395-397.
- Underwood, N. R., & McConkie, G. W. (1985). Perceptual span for letter distinctions during reading. *Reading Research Quarterly*, 153-162.
- Van Nes, F. L., & Jacobs, J. C. (1981). The effect of contrast on letter and word recognition. *IPO Ann. Prog. Rep.*, 16, 72-80.
- Warrington, E. K., & Shallice, T. (1980). Word-form dyslexia. *Brain: a journal of neurology*, 103(1), 99.
- Watson, A. B., Barlow, H. B., & Robson, J. G. (1983). What does the eye see best? *Nature*, 302(5907), 419-422.
- Weekes, B. S. (1997). Differential effects of number of letters on word and nonword naming latency. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 50(2), 439-456.
- Weissman, D. H., & Woldorff, M. G. (2005). Hemispheric asymmetries for different components of global/local attention occur in distinct temporoparietal loci. *Cerebral Cortex*, 15(6), 870-876.
- Willenbockel, V., Fiset, D., Chauvin, A., Blais, C., Arguin, M., Tanaka, J. W., ... & Gosselin, F. (2010). Does face inversion change spatial frequency tuning?

Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance,
36(1), 122.

Yamaguchi, S., Yamagata, S., & Kobayashi, S. (2000). Cerebral asymmetry of the " top-down" allocation of attention to global and local features. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 20(9), RC72.