

Doctorat Aix-Marseille Université

UFR Sciences de la Vie

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Neurosciences

Aix-Marseille Université

Etude des aspects visuels et oculomoteurs de la lecture en vision centrale et périphérique

présentée et soutenue par

Marina Yao-N'Dré

Directeurs de thèse :

Mme Françoise Vitu-Thibault et M. Eric Castet

Membres du Jury :

Pr. Marc Brysbaert, Université de Gand

Rapporteur

Dr. Zoï Kapoula, CNRS, Paris

Rapporteur

Dr. Muriel Boucart, CNRS, Université Lille 2

Examineur

Dr. Anna Montagnini, CNRS, Aix-Marseille Université

Examineur

Pr. Franck Vidal, CNRS, Aix-Marseille Université

Examineur

Dr. Françoise Vitu-Thibault, CNRS, Aix-Marseille Université

Directrice

Dr. Eric Castet, CNRS, Aix-Marseille Université

Directeur

Le 13 mars 2013

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier **Françoise Vitu-Thibault** et **Eric Castet**, mes directeurs de thèse, de m'avoir accompagnée durant ces années de thèse et de Master. Vous rassemblez absolument toutes les qualités humaines et scientifiques dont une étudiante puisse rêver. Vous avez su me montrer, qu'un travail consciencieux, abouti, et réalisé avec passion, pouvait s'avérer, au final, très gratifiant. Je n'oublierai pas de sitôt, les réunions du lundi matin et les e-mails du dimanche soir, les tableaux Statistica et les modèles généralisés, les départs en conf et les discussions au bar, les lunettes rondes et la coupe au carré.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement les membres du jury d'avoir bien voulu lire ce travail de thèse et d'avoir accepté d'assister à ma soutenance. Merci aux rapporteurs, **Zoï Kapoula** et **Marc Brysbaert**, pour leur évaluation et leurs remarques critiques, et à **Muriel Boucart**, **Anna Montagnini** et **Franck Vidal**, pour leur lecture et leurs commentaires.

There's no place like...lab. Merci à tous les membres du LPC de faire des couloirs de ce laboratoire un endroit accueillant et enrichissant. Merci à tous les chercheurs, docs et post-docs du LPC. Merci aux anciens qui étaient déjà là en 2008, et qui, selon la légende, auraient créé l'aile des doctorants de leurs mains, à partir de quelques planches de bois (True story!) : **Lenda**, **Caro**, **Laeti**, **Delphine**, **Pauline**, **Nicolas** et **Yousri**. Merci à ceux qui ont fait tenir les planches pendant les années qui suivirent : **Michael** (Secret President of the SIB), **Rachel**, **Maria**, **Myriam**, **Catarina**, **Claire**, **François** et **Christophe**, et à ceux qui vont le faire pendant les années qui arrivent : **Sebastian**, **Laure**, **Sylvain**, **Auréli**, **Svetlana**, **Cécile** et **Kévin**.

Idriss ! Poulette ! Tu réponds toujours présente, que ce soit pour aider les gens ou pour prendre l'apéro. Ta gentillesse et compassion m'ont tout simplement redonné foi en l'humanité. **Clément**, on reconnaît la vraie passion d'un scientifique à son engagement dans les causes perdues ; j'ai compris ça le jour où tu nous as aidées à construire une fontaine avec des pailles et des bouteilles en plastique, projet qui échoua lamentablement, bien entendu. **Olivia**, toi non plus pour l'apéro, t'es pas la dernière ! Merci pour les pauses déjeuner, les discussions gamelles, les sorties au théâtre pour voir tes 43 beaux-frères... **Joanna**, compagne de galère pendant le mois de décembre. Merci pour les petits mots, les coucous, les pauses, les messages fb... toutes ces petites gestes sympas qui m'ont montré que je n'étais pas seule au labo, même le dimanche aprèm. **Mariel**, merci pour tes entrées tout sourire dans le bureau et pour tes muffins qui m'ont évité plus d'une fois la crise d'hypoglycémie aigüe de 11h30. **Delphine**, petite *Padawan* de thèse et

qui déjà manie 'R' comme un vrai *Jedi* ("The Force is strong with this one !"). Ta passion et ton énergie te mèneront loin, où que tu veuilles aller.

Un arc-en-ciel de bisous aux Princesses du bureau, vous avez illuminé ma vie au labo de 58 milliards de paillettes. Sans vous, ça ferait longtemps que je serais partie élever des licornes en Patagonie.

Soazig, Princesse parmi les Princesses. Cette aventure thésésque n'aurait pas été la même si tu ne l'avais pas partagée avec moi. On a bien grandi (ou pas) depuis la rédaction du mémoire de M2 dans le box, les galères sous Statistica ('fin surtout toi), la conf' à Soutampon, les Furbys, les vélouses... Merci pour toutes tes attentions, les cadals de quand tu partais en vacances, le pain de mie de quand tu revenais de le ED. Et même si je suis plus dans le bureau, je continuerai à bitcher avec toi sur l'internet, à t'envoyer des liens vers des sites chronophages, à regarder tes vidéos de lamantins crétiens, à t'écouter râler à propos de ta belle mère, et tout et tout...

Ellie. Pfffiou, j'sais pas comment t'as fait pour écrire ta thèse mais moi, j'suis trop fatiguée.... Ca doit être un truc de Noirs, ça. Ces années à apprendre à te connaître étaient vraiment géniales. Tu n'as pas arrêté de me surprendre, par ton caractère, ton travail et par certains détails dont je me serais bien passée (éhéh). J'espère en apprendre encore des tonnes sur toi et je sais que les occasions ne manqueront pas (tu crois pas que je vais te laisser aller pécho des cuisiniers russes sans moi, hein ? Oh !).

Suzanne, que dis-je ? Madame Suzanne! Mental de Yougos, cœur de Bisounours, mélange ma foi, curieux, mais qui fait de toi quelqu'un d'exceptionnel?. Plein de bons souvenirs aussi, les joggings à 8h du mat', les pizzas (pour éliminer le jogging), les soirées et bien sûr, les DEUX séances de shopping en 5 ans. Je ne veux pas faire ma Cristina Cordula, mais 'Ma Chérricee ! Tu es Ma-gni-faique !'

Sophie, tu es un modèle de volonté et d'énergie. Tu pourrais faire tourner des fois... Merci de m'avoir accueillie dans ta famille pour cet évènement culturel qu'est la fête du vin jaune, merci pour les meules de comté, Thiéfaïne et la saucisse cancoillotte... Bon, j'arrête ou les gens vont savoir que tu viens des contrées jurassiennes (chuuut !). Merci pour tes conseils, tes tentatives de remuage souvent sans succès, pour la rigolade et pour les e-mails/potins de Paris qui font plaisir.

Kim, toutes tes folies m'ont permis de conserver ma santé mentale. Merci pour tes affiches dans le bureau, pour tes messages de soutien, pour ton goût pour l'abscons, pour le fantasque et l'incongru. On en aura vécu des aventures, tantôt vampires dans une soirée petits déb', tantôt chasseuses de cafards moyenâgeux, sans oublier les 'Family Feud' dans la nuit

(« moobs ») et la tentative de manipulation d'un caissier de Virgin. Depuis ton enterrement, les jours se suivent et se ressemblent...

Stéphanie, une main de fer dans un gant en titane... mais un cœur en or. Même à 6000 miles de Marseille, tu penses toujours à prendre de mes nouvelles et à me remonter le moral par e-mail. J'espère qu'on se reverra bientôt, aux States ou en Californie ou autre part.

Lotje, cela fait très peu de temps que l'on se connaît, mais tu fais preuve de tellement de gentillesse et d'empathie que j'ai déjà dû te raconter la moitié de ma vie. Merci de l'avoir écoutée. Voilà, après je peux écrire n'importe quoi, tu ne comprends pas trop le français de toutes façons.

Céline, Master en poche : check, une classe à toute épreuve : check, un grain de folie : double check ! Ya pas à dire, tu as passé le test des Princesses haut la main ! Des bécots et bon courage pour la suite.

Et parce que le thé vert ça va bien un moment, merci aux garçons qui ont permis un retour en force de l'apéro dans le bureau. **Carlos**, je me rappelle encore la première fois que l'on s'est vus au labo et que tu m'as demandé : « Heu... et tu t'organises comment pour le travail quand tu rentres chez toi ? ». Mouahaha... Content de voir que tu as écouté mes conseils. **Julien** (T'as vu ? T'es là !). Merci d'être allé chercher tous ces sandwiches à la boulangerie pendant que j'avais des parties de belot... heu... des chapitres de thèse à finir. Bon, t'as plus d'excuse maintenant, même moi j'ai fini. **Yann**, merci pour les binouzes du soir et les quelques cafés du matin. Merci aussi d'avoir saisi certaines de mes références 'peura' qui, sans toi, seraient tombées à l'eau ; on se sent moins seule avec un aficionado du bon son dans le bureau. **Dash**, mon voisin d'en face. Merci pour les liens internet, les photos et bien sûr, les gâteaux, qui m'ont bien souvent remonté le moral.

Joak, mon coloc' préféré, 'my brother from another mother'. Merci en particulier pour les derniers jours de rédaction, où tu as veillé à ce que mon allergie au travail ne me soit pas fatale et à ce que le frigo soit toujours rempli (essentiellement de bières, certes, mais bon...). Je te serai éternellement reconnaissante pour toutes ces infos particulières d'inculture générale, d'intérêt relatif et de geekitude absolue, qui m'ont permis de briller en société sans jamais suivre une conversation. Tu vas me manquer quand tu seras en Japonie.

Merci, aussi, aux membres de **l'ex-INCM/nouvel INT**, Quentin, Giacomo, Andrew, Fred, Nia, Rémi, Bjørg, Mina, Claudio, Amar, Jéré, Elisa, Taarabte, Nicole, Jo, Alex, Anna

(encore) et Andrea. Une pensée particulière à **JB** et **Aurélie**, qui m'ont fait découvrir le labo à mon arrivée en Master 1 et avec qui j'ai fait mes premières armes sur l'Eye-Link et sous 'R'.

Un huge bécot aux coupaings de la Seynegeles, **Co, Ju, Grégo, Matt, Barbwa, Tho** et **Anne-So, Lyl', Aurélie, Céline** et **Seb**...le Janas Crew, en fait! Merci pour la rigolade, les potins et les cercles après le Buffalo, pour votre humour à la limite de la lourdeur et notre amitié de 115 ans ou presque. A **Iyman**. On n'arrive jamais à s'avoir au tél, mais je ne m'en fais pas, je sais que la prochaine fois qu'on se verra, notre amitié n'aura pas pris une ridule.

Merci aussi à mes anciens et nouveaux amis marseillais, **Prisca** et **Laurent, Tim, Dédé, Nico** et **Krystyna. Meh'**, j'ai plus d'ami depuis que tu es parti en Suédie. Dès que tu reviens, on se fait un footing et des bourreks, à l'ancienne. 'Stambééé! **Elise**, combien d'heures passées au téléphone et de soirées à « sédimenter » devant la télé ? On a dû y passer un quart de vie, et ça valait totalement le coup. **Johanna, Laurence**, vous êtes au top les coupines ! Merci pour les apéros, les soirées à parler fort, les fous rires, les apéros (j'l'ai dit ?). J'aimerais aussi saluer 'mes amis, mes collègues du tatami' et tout particulièrement, **Laurence**, ma super-sempai, et **Arnaud**...Tu te calmes!

Ces derniers mots vont à ma famille. Un gros bisou à **Adrian, Magali, Juliette** et **Fabien**, mes frères et sœurs, sans qui je serais fille unique. Merci pour les tours à vélo au Mont d'Or, les vacances à Pierreuf et les parties de console, les disputes et tout ce qui fait qu'il n'y a pas mieux que de grandir entouré d'une fratrie. Et un énorme merci ma **Maman de moi, mon Papa Raymond** et ma **Mamie**, qui m'ont donné tous les moyens pour que je réussisse. Merci de m'avoir permis de m'installer à Marseille, il y a déjà 11 ans de ça, de m'avoir fait confiance et de m'avoir soutenue tout au long de mes études. Une bise à **Tatie Renée, Tonton Jo** et **Alain**. Une pensée à mon **Papy**.

Résumé

La lecture est un vaste domaine d'étude, qui s'intéresse entre autres, aux facteurs déterminant la visibilité de lettres et les mouvements oculaires. Néanmoins, l'approche de ces mécanismes reste différente selon qu'elle concerne la vision centrale ou périphérique. Cette thèse proposait, au contraire, une approche conjointe dans le but (1) de mettre en évidence les effets des facteurs visuels limitant la reconnaissance de mots, (2) de mieux comprendre le comportement oculomoteur lors de la lecture en vision centrale et (3) d'étudier le rôle des facteurs oculomoteurs spécifiques à la lecture en vision périphérique. Trois expériences ont été menées.

La première était axée sur l'étude des facteurs visuels. Elle a mis en évidence que l'effet OVP est moins important pour des mots présentés dans le champ visuel inférieur. Ce résultat pouvant s'expliquer par la géométrie de l'acuité visuelle et de l'encombrement, suggère que la lecture en périphérie est limitée par les mêmes facteurs qu'en vision centrale.

La deuxième étude s'intéressait à l'influence de la stabilité de fixation sur la lecture de phrases en présence d'un scotome artificiel. Elle a révélé que la vitesse de lecture pouvait être améliorée en ajoutant une stimulation fovéale stable au sein du scotome. En revanche, cette stimulation ne permettait pas d'améliorer la stabilité du regard durant la fixation, ce qui suggère qu'elle agirait plutôt sur la programmation des saccades.

Enfin, la troisième expérience réexaminait l'effet de la taille des lettres sur le comportement oculomoteur en vision centrale. Elle a révélé que les mouvements oculaires variaient selon la taille des lettres, et ce différemment selon la position du regard par rapport au centre des mots. Ce résultat, nouveau, est vraisemblablement attribuable à l'effet de processus visuomoteurs précoces. Il questionne les hypothèses classiques du guidage oculomoteur lors de la lecture en vision centrale, et soulève aussi des questions méthodologiques pour l'étude de l'empan visuel et de la lecture en vision périphérique.

En conclusion, l'étude conjointe de la lecture en vision centrale et périphérique est prometteuse, non seulement d'un point de vue fondamental, mais aussi pour l'aide aux patients atteints de déficiences visuelles telles que la DMLA.

Mots clés : lecture, basse vision, scotome artificiel, mouvements oculaires, effet OVP

Abstract

Reading is a large research field, which investigates for a great part the variables influencing letter visibility and eye movements. However, its study in central and peripheral vision has been conducted in parallel and with different approaches. Our work relied, on the contrary, on a joint approach in order (1) to uncover the visual factors limiting word recognition, (2) to better determine how the eyes move during reading in central vision, and (3) to study the role of oculomotor factors that might affect reading in peripheral vision. Three experiments were conducted.

The first study focused on the role of visual factors in word identification. It showed that the OVP effect is reduced for words displayed in the lower visual field. This result, which can be explained by the geometry of visual acuity and visual crowding, suggests that reading in peripheral vision is limited by the same visual factors as reading in central vision.

The second study investigated the influence of fixation stability on sentence reading using an artificial scotoma. It revealed that reading speed could be improved when adding a stable foveal stimulation within the scotoma. However it failed to improve the stability of the eyes during a fixation, which suggests that this stimulation may instead influence saccade programming.

The third experiment re-examined the possible influence of character size on eye movements in central vision. It revealed that eye movements varied depending on letter size, and differently as a function of the location of the eye relative to the center of words. This novel finding was very likely the effect of early visuomotor processes. While this argues against the classical account of eye guidance in reading in central vision, it also raises crucial methodological questions for the study of the visual span and reading in peripheral vision.

In conclusion, the joint study of reading in central and peripheral vision is promising, not only at a fundamental level, but also for a better understanding of retinal visual deficits, such as AMD.

Keywords: reading, low vision, artificial scotoma, eye movements, OVP effect

TABLES DES MATIERES

Chapitre 1 : Rappels anatomiques et fonctionnels sur le système visuel.....	5
1-1 – L’œil et les voies visuelles	5
1-1-1 – Le champ visuel	5
1-1-2 – La rétine	5
1-1-3 – Les voies visuelles et le cortex.....	11
1-2 – Physiologie des mouvements oculaires	16
1-2-1 – Le contrôle oculomoteur	16
1-2-2 – Les différents types de mouvements oculaires.....	21
1-2-3 – Propriétés des saccades	23
Chapitre 2 : La lecture en vision normale	31
2-1- Le codage orthographique et l'accès au lexique.....	31
2-1-1 – De la lettre au mot	31
2-1-2 – Influence des facteurs lexicaux	33
2-1-3 – Les modèles de la psycholinguistique.....	36
2-2- Performances visuelles et visibilité des lettres.....	39
2-2-1 – Performances visuelles en vision centrale et périphérique	39
2-2-2 – La visibilité des lettres	45
2-2-3 – Empan visuel et empan perceptif.....	51
2-3 – Importance de la position de regard dans un mot : le phénomène OVP	55
2-3-1 – Caractéristiques du phénomène OVP.....	55
2-3-2 – Les contraintes visuelles sous-tendant le phénomène OVP	58
2-3-3 – Les contraintes orthographiques liées au phénomène OVP	62
2-4– Comportement oculomoteur et lecture de texte	64
2-4-1 – Les modèles du guidage oculaire durant la lecture	64
2-4-2 – Les déterminants du comportement oculomoteur intra-mots.....	70
2-4-3 – Les déterminants du comportement oculomoteur inter-mots.....	75
Chapitre 3 : Basse vision et lecture en vision périphérique	83
3-1 – Pathologies liées à la perte de la vision centrale	83
3-1-1 – La basse vision	83
3-1-2 – La Dégénérescence Maculaire liée à l’Age (DMLA)	85
3-2 – Adaptations anatomiques et fonctionnelles à la présence d’un scotome.....	89
3-2-1 – Adaptations neuro-anatomiques du système visuel	89
3-2-2 – Adaptation stratégique : mise en place d’une PRL	91
3-2-2-4 – Aides visuelles et rééducation orthoptique	94
3-3 – La lecture en vision périphérique	95
3-3-1– Paradigmes d’étude des performances de lecture	96
3-3-2– Facteurs visuels limitant les performances de lecture.....	97
3-3-3 – Aspects oculomoteurs de la lecture en vision excentrée.....	101
3-3-4 – PRL et lecture.....	107
Chapitre 4 : Problématique.....	111
Chapitre 5 : Etude de la reconnaissance de mots en vision centrale et périphérique.....	117

5-1 – Introduction	117
5-1-1 – L’effet OVP en vision centrale	117
5-1-2 – Devenir de l’effet OVP en vision périphérique.....	119
5-2 – Méthode	123
5-2-1 – Participants.....	123
5-2-2 – Matériel	123
5-2-3 – Procédure.....	123
5-2-4 – Plan expérimental et carré latin.....	125
5-2-5 – Appareillage	126
5-2-6 – Sélection des données	126
5-2-7 – Méthodes d’analyse des données	127
5-3 – Résultats	130
5-3-1 – Courbes OVP	130
5-3-2 – Analyse statistique	131
5-4 – Discussion	134
5-4-1 – Un rôle majeur des facteurs visuels	134
5-4-2 – Autres facteurs pouvant expliquer l’effet observé	136
5-4-3 – Implications pour la lecture en vision périphérique.....	139
5-5 – Conclusion	140

Chapitre 6 : Etude du rôle de la stabilité de fixation sur la lecture en vision périphérique..... 143

6-1 – Introduction	143
6-1-1 – La programmation saccadique	143
6-1-2 – La stabilité de fixation.....	144
6-1-3 – Objectif de l’étude et variable étudiée	147
6-2 – Méthode	150
6-2-1 – Participants.....	150
6-2-2 – Enregistrement des mouvements oculaires et scotome artificiel	150
6-2-3 – Matériel	151
6-2-4 – Plan expérimental et procédure.....	152
6-2-5 – Variables analysées	152
6-3 – Résultats	154
6-3-1 – Effet de la condition de présentation sur la vitesse de lecture	154
6-3-2 – Effet de la condition de présentation sur la BCEApf.....	159
6-4 – Discussion	160
6-4-1 – Applications pratiques chez les patients DMLA.....	161
6-4-2 – Facteurs liés à la stimulation visuelle.....	161
6-5 – Conclusion	163

Chapitre 7 : Etude de l’effet de la taille des lettres sur le comportement oculomoteur en vision centrale

7-1 – Introduction	165
7-1-1 – Données empiriques sur l’effet de la taille des caractères	166
7-1-2 – <i>rOVP</i> , <i>I-OVP</i> et taille des caractères.....	168
7-1-2– Effet du site de départ et taille des caractères	170
7-1-3 – Variables étudiées	173
7-2 – Méthode	174

7-2-1 – Participants.....	174
7-2-2 – Matériel.....	174
7-2-3 – Plan expérimental.....	175
7-2-4 – Procédure.....	176
7-2-5 – Appareillage.....	176
7-2-6 – Sélection des données.....	177
7-2-7 – Méthodes d’analyse des données.....	177
7-3 – Résultats.....	180
7-3-1 – Amplitude et position d’atterrissage des saccades.....	180
7-3-2 – Durées de fixation et de la probabilité de refixation : effets I-OVP et rOVP ...	184
7-3-2 – Durées des fixations dans le cas de deux fixations consécutives sur le mot.....	189
7-4 – Discussion.....	192
7-4-1– Effets de la taille et empan visuel.....	192
7-4-2– Effet de la taille sur les durées de fixation: un effet double, visuomoteur et cognitif.....	193
7-4-3 – Effet I-OVP : un argument en faveur d’une hypothèse visuomotrice.....	195
7-4-4 – Taille des lettres et effet du site de départ.....	197
7-5 - Conclusion.....	199
Discussion générale.....	203
8-1 – Rôle des facteurs visuels dans lecture.....	203
8-1-1 – Cadre théorique et questions posées.....	203
8-1-2 – Résultats et discussion.....	206
8-2 – Etude des aspects oculomoteurs de la lecture.....	210
8-2-1 - Comportement oculomoteur en vision centrale et taille des lettres.....	210
8-2-2 - Comportement oculomoteur en vision périphérique et stabilité de fixation.....	216
8-3 – Conclusion et perspectives.....	220
REFERENCES.....	225
Annexes.....	239

CHAPITRE 1 : RAPPELS ANATOMIQUES ET FONCTIONNELS SUR LE SYSTEME VISUEL

Le système visuel est l'ensemble des organes et structures permettant de capter, transformer et interpréter les signaux lumineux de l'environnement. Afin de comprendre les mécanismes mis en jeu en présence d'un stimulus visuel, notamment lors de la lecture, il est essentiel de savoir comment est organisé ce système et de quelle manière il transmet l'information jusqu'au cerveau. Ce premier chapitre rappelle tout d'abord les notions fondamentales concernant la structure et le fonctionnement du système visuel, de l'œil au cortex visuel. Nous y présenterons ensuite les différences fonctionnelles entre la vision centrale et la vision périphérique et les phénomènes qui les sous-tendent.

1-1 – L'ŒIL ET LES VOIES VISUELLES

1-1-1 – Le champ visuel

Le champ visuel monoculaire est l'ensemble de l'espace perçu par un œil immobile fixant droit devant. Sa taille est d'environ 160° sur l'axe horizontal (60° du côté nasal et 90° du côté temporal) et 135° sur l'axe vertical (60° vers le haut et 75° vers le bas). Le champ visuel binoculaire est formé par la superposition des champs visuels des deux yeux ; il s'étend donc sur 180° sur l'axe horizontal. Lorsque les rayons lumineux traversent l'œil, ils sont réfractés et se projettent de façon inversée sur la rétine : la partie gauche du champ visuel se projette donc sur la partie droite de chaque rétine, c'est-à-dire la partie nasale de l'œil gauche et temporale de l'œil droit et inversement pour le champ visuel droit. Il en est de même pour l'axe vertical : la partie supérieure du champ visuel est projetée sur la partie inférieure de la rétine et la partie inférieure sur la rétine supérieure de chaque œil ([Risse, 1999](#)).

1-1-2 – La rétine

L'œil est le point d'entrée du système visuel. Il est composé de plusieurs parties transparentes (cornée, humeur aqueuse, pupille, cristallin et corps vitré) permettant de filtrer les signaux lumineux qui arrivent au fond du globe oculaire, sur la rétine (cf. Figure 1.1).

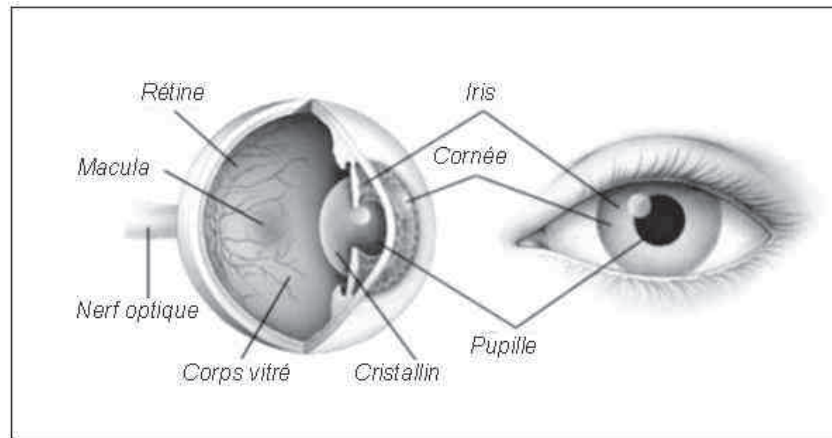


Figure1.1- Anatomie de l'œil et de la rétine.

Coupe sagittale (à gauche) et vue frontale (à droite) du globe oculaire. Les rayons lumineux traversent les parties antérieures transparentes (cornée, humeur aqueuse, pupille, cristallin et corps vitré) puis sont captés par les cellules de la rétine tapissant la surface postérieure du globe oculaire. Modifié depuis <http://www.biometrie-online.net/>.

1-1-2-1 – Organisation superficielle

La rétine est une fine membrane neuronale tapissant 75% de la face interne de l'œil. Lors d'un examen ophtalmique simple de type « fond d'œil », il est possible de voir la surface de la rétine que l'on peut décomposer en deux zones ayant une composition et des propriétés différentes : la rétine centrale et la rétine périphérique.

La rétine centrale, située dans le prolongement de l'axe optique, est composée de trois parties concentriques imbriquées au diamètre décroissant ([Buser & Imbert, 1987](#))

- la macula, qui mesure environ 5,5 mm de diamètre,
- la fovéa, une zone de 1,5 mm de diamètre soit environ 3° du champ visuel. La zone fovéale apparaît plus sombre en imagerie car elle ne possède pas de vaisseaux sanguins mais est vascularisée indirectement via la choroïde, une membrane nutritive et protectrice située derrière la rétine. La densité des cellules photoréceptrices, et tout particulièrement des cônes, y est très importante.
- la fovéola, partie centrale de la fovéa (0,35 mm de diamètre) qui ne contient que des cônes.

La zone périphérique de la rétine, est recouverte de vaisseaux sanguins qui se regroupent au niveau de la papille, une zone plus claire correspondant à la naissance du nerf optique. Il est important de noter que la papille optique est une zone de la rétine qui ne contient pas de photorécepteur ; elle constitue donc une « tâche aveugle » dans le champ visuel, d'environ 2 mm de diamètre ([Jonas et al., 1988](#)).

Cette distinction anatomique entre les zones centrale et périphérique se retrouve dans les couches plus profondes de la rétine et tout au long des voies visuelles.

Lorsque l'on observe la rétine en coupe, il est possible de distinguer trois couches neuronales principales qui sont, de la plus profonde à la plus superficielle : la couche des photorécepteurs, la couche intermédiaire (cellules horizontales, bipolaires et amacrines) et la couche des cellules ganglionnaires. Ces trois couches sont séparées par les couches plexiformes externe et interne où se font les connexions entre les neurones (cf. Figure 1.2). En plus de ces couches neuronales, la rétine contient une couche de cellules épithéliales pigmentaires située entre les photorécepteurs et la partie externe du globe oculaire, la choroïde. La choroïde joue un rôle de protection et d'irrigation du reste de la rétine. Il est important de noter que lors de son trajet à travers la rétine, la lumière traverse d'abord les couches ganglionnaire et intermédiaire avant d'atteindre celle des photorécepteurs où elle sera captée et transformée en influx nerveux.

1-1-2-2 – La couche des photorécepteurs

Cette couche neuronale est en contact avec l'épithélium pigmentaire (ou choroïde). Elle est composée de deux types de cellules photoréceptrices, les cônes et les bâtonnets, en proportions différentes selon la zone de la rétine. Ces neurones spécialisés dans la conversion de la lumière en signal nerveux possèdent, dans leur segment externe, des pigments photosensibles, et à l'extrémité de leur segment interne, une terminaison synaptique en lien avec les interneurones de la couche intermédiaire.

Les bâtonnets représentent la grande majorité des photorécepteurs, environ 95%, et sont surtout situés dans la partie périphérique de la rétine ([Curcio et al., 1990](#) et cf. Figure 1.3). Leur segment externe est très développé, ce qui leur confère une grande sensibilité à la lumière. De plus, ils établissent des connexions convergentes avec les cellules des couches suivantes ; une cellule ganglionnaire est reliée à de nombreux bâtonnets via les cellules de la couche intermédiaire. Ceci améliore encore la sensibilité mais diminue la résolution spatiale de la vision en périphérie.

Les cônes sont plus petits que les bâtonnets et en concentration très importante au niveau de la macula (Figure 1.3). Ils établissent des connexions peu convergentes avec les neurones des couches suivantes ce qui permet une activation plus spécifique des cellules ganglionnaires et donc une meilleure discrimination des détails en vision centrale. De plus,

leur pigment est sensible à une longueur d'onde donnée, et l'activation combinée des différents types de cônes (bleus, rouges et verts) permet la discrimination de toutes les couleurs du spectre, du violet au rouge. Ils sont cependant moins sensibles à la lumière et sont donc seulement utilisés pour la vision photopique.

1-1-2-3 – La couche intermédiaire

Dans la couche intermédiaire se trouvent les cellules bipolaires, horizontales et amacrines qui établissent des liens directs ou indirects entre photorécepteurs et cellules ganglionnaires.

- les cellules bipolaires forment une voie de communication directe entre les photorécepteurs et les cellules ganglionnaires.

- les cellules horizontales sont un relais entre les photorécepteurs et les cellules bipolaires et ont pour fonction de filtrer le signal par un mécanisme d'inhibition latérale.

- les cellules amacrines établissent des liaisons entre les cellules bipolaires et ganglionnaires.

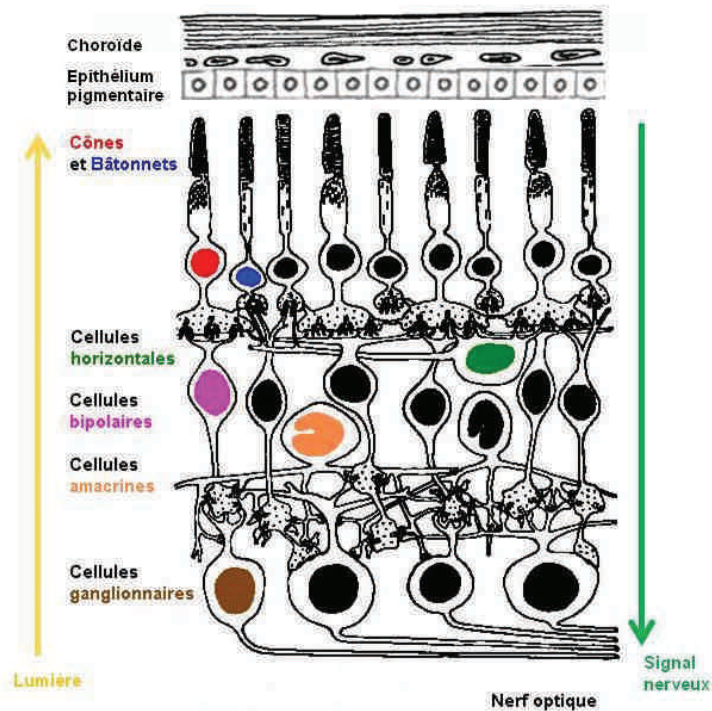


Figure 1.2 - Schéma de la structure cellulaire de la rétine.

La lumière traverse les couches cellulaires nerveuses puis est captée par les photorécepteurs (cônes et bâtonnets). Le signal nerveux est transmis des photorécepteurs jusqu'au nerf optique. *Modifié depuis http://www.dino-optic.fr/newgoe1_6.htm.*

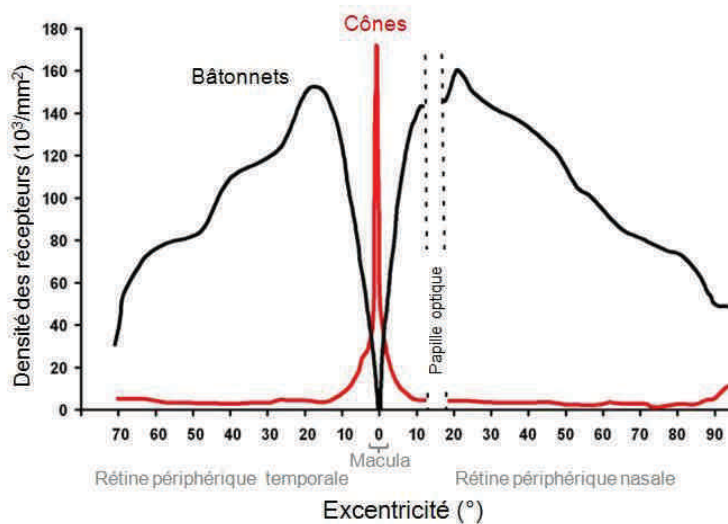


Figure 1.3 – Répartition des photorécepteurs de la rétine le long du méridien horizontal.

La macula est composée presque exclusivement de cônes tandis que la rétine périphérique contient une très grande majorité de bâtonnets. *Modifié depuis [Østerberg \(1935\)](#).*

1-1-2-4 – La couche des cellules ganglionnaires

Les cellules ganglionnaires sont la dernière étape de traitement du signal au niveau rétinien. Leurs longs axones se regroupent au niveau de la papille pour former le nerf optique et se prolongent, pour la plupart, jusqu'aux corps géniculés latéraux situés dans le thalamus. Il faut noter que ce sont les seuls neurones de la rétine à produire des potentiels d'action ; les autres types de neurones émettant seulement des potentiels électriques gradués dont l'intensité détermine la réaction du neurone post-synaptique. On distingue deux principaux types de cellules ganglionnaires qui se distinguent par leur structure et leur fonction ([Kandel et al., 1991](#)) :

- les cellules de type P, qui représentent environ 80% des cellules ganglionnaires. Leur arborisation dendritique est peu étendue car elles ne sont reliées qu'à un petit nombre de photorécepteurs (moins d'une dizaine au centre de la fovéa), en particulier des cônes. Elles sont connectées au système parvocellulaire utilisé pour la discrimination des détails et la vision des couleurs.

- les cellules de type M sont beaucoup moins nombreuses (10% des cellules ganglionnaires environ) et sont surtout reliées à des bâtonnets situés à la périphérie de la rétine. Les cellules de type M ont une taille plus importante et une arborisation dendritique plus grande que les cellules de type P car elles peuvent être reliées à plusieurs milliers de photorécepteurs. Leur champ récepteur est plus grand, elles sont plus sensibles au contraste et leur vitesse de conduction est plus importante que les cellules de type P. Pour ces raisons, les cellules de type M, reliées au système magnocellulaire, sont impliquées préférentiellement dans le traitement global de l'information et la détection du mouvement.

En plus de ces deux principales populations cellulaires, d'autres types de neurones ganglionnaires ont été découverts plus récemment. Parmi eux, il est important de citer les cellules de type K, qui forment la voie « koniocellulaire », intermédiaire entre les voies parvo- et magnocellulaire.

1-1-3 – Les voies visuelles et le cortex

Les axones des cellules ganglionnaires de la rétine se regroupent au niveau de la papille pour former le nerf optique. Puis, un peu plus loin, les fibres venant des parties nasales des deux rétines vont se croiser au niveau du chiasma optique pour rejoindre les hémisphères opposés. Cette décussation partielle des axones permet de rassembler toutes les fibres traitant l'information venant d'un hémichamp visuel dans l'hémisphère cérébral opposé. En effet, à la sortie du chiasma optique, les fibres venant de la partie temporale de la rétine droite et de la partie nasale de la rétine gauche vont former le tractus optique droit, responsable de la vision de l'hémichamp visuel gauche et inversement. Après le chiasma optique, on distingue plusieurs voies visuelles (cf. Figure 1.4) : la voie visuelle rétino-géniculo-corticale (dite aussi voie primaire) qui se projette sur le cortex visuel, et les voies visuelles secondaires qui rejoignent des structures sous-corticales ([Purves et al., 2001](#)).

1-1-3-1 – La voie rétino-géniculo-corticale

Cette voie, aussi appelée voie visuelle primaire, est responsable de la perception visuelle consciente. Elle arrive sur le cortex visuel primaire situé dans le lobe occipital après avoir établi un relais synaptique dans le thalamus au niveau des **corps géniculés latéraux (CGL)**. Les CGL ne sont pas qu'un simple relais de cette voie visuelle, ils permettent aussi d'organiser et de moduler l'information. Ils possèdent six couches neuronales qui reçoivent les projections des cellules ganglionnaires de manière organisée :

- les couches ventrales 1 et 2 contiennent des neurones de grande taille connectés aux cellules ganglionnaires de type M et forment **la voie magnocellulaire**. Les neurones de la voie magnocellulaire ont des axones de gros diamètre et répondent de manière rapide et phasique aux stimuli. Et, puisqu'ils sont connectés aux bâtonnets de la rétine périphérique, ils sont sensibles aux faibles contrastes lumineux et aux basses fréquences spatiales.

- les quatre couches dorsales, numérotées de 3 à 6, sont le départ de **la voie parvocellulaire**. Elles contiennent des cellules plus petites, connectées aux cellules ganglionnaires de type P, et répondent de manière plus lente et tonique que les cellules magnocellulaires. La voie parvocellulaire est reliée, de manière indirecte, aux cônes de la rétine centrale. Elle est donc utilisée préférentiellement pour la discrimination des détails (hautes fréquences spatiales) et la vision des couleurs.

Les six couches des CGL sont aussi organisées en fonction de la provenance des fibres qu'elles reçoivent : les couches 1, 4 et 5 reçoivent les fibres provenant de la rétine controlatérale et les couches 2, 3 et 6 celles de la rétine ipsilatérale.

La modulation de l'information visuelle au niveau des CGL s'effectue à la fois par une augmentation de la quantité de fibres provenant de la macula au détriment des fibres de la rétine périphérique et par un rétrocontrôle important venant du cortex visuel primaire et de structures sous-corticales.

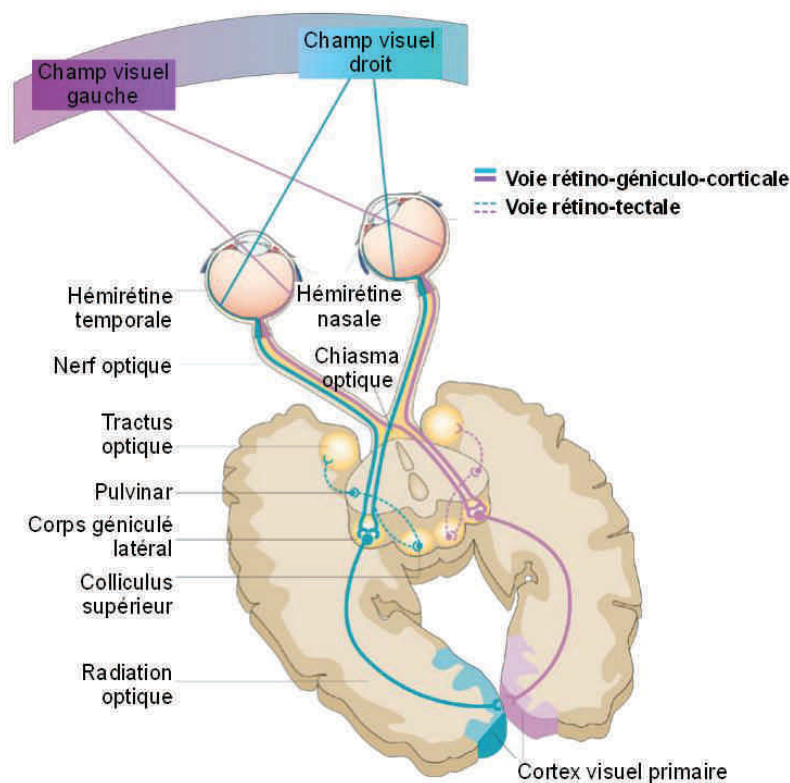


Figure 1.4 - Les principales voies visuelles.

Après une décussation partielle au niveau du chiasma optique, les fibres vont rejoindre le cortex visuel primaire par la voie rétinogéniculocorticale ou des zones sous-corticales, notamment le colliculus supérieur par la voie rétinotectale. Après le chiasma optique, chaque hémichamp visuel est traité par un hémisphère cérébral différent. *Modifié depuis Hannula, Simons & Cohen (2005).*

1-1-3-2 – Le cortex visuel primaire

La majeure partie des neurones des CGL se projette sur l'aire visuelle primaire (V1), située dans la partie la plus occipitale du cortex, de part et d'autre de la fissure calcarine. Comme les autres zones du cortex, V1 est composé de plusieurs couches neuronales (6) établissant des connexions entre elles (connexions interlaminaires verticales) et des connexions afférentes ou efférentes avec d'autres zones cérébrales. Les neurones du CGL se projettent sur la couche IV du cortex visuel primaire. Comme les CGL, le cortex visuel primaire est latéralisé (chaque hémisphère cérébral reçoit l'information en provenance du champ visuel controlatéral) et organisé de manière rétinotopique. Chaque zone de la rétine correspond à une zone précise du cortex visuel primaire. Les cellules ganglionnaires de la voie parvocellulaire, correspondant à la zone centrale du champ visuel, se projettent sur les parties les plus postérieures de V1, tandis que les cellules de la voie magnocellulaire, correspondant aux zones périphériques du champ visuel, se projettent sur les parties antérieures du cortex visuel primaire. La surreprésentation de la zone fovéale au détriment des zones plus périphériques se retrouve aussi au niveau cortical. On appelle **facteur de magnification corticale** le ratio entre une surface du champ visuel (en degrés) et la taille de sa représentation dans le cortex (en mm). Ce facteur est maximal au niveau de la fovéa (environ 10 mm/degré à 1° d'excentricité) et diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne du centre du champ visuel. A 10° d'excentricité, il n'est plus que de 1,6 mm/degré ([Holmes G., 1919](#); [Horton & Hoyt, 1991](#)).

Le cortex visuel primaire est le premier niveau de traitement de l'information visuelle au niveau cortical. Il a pour fonction de rassembler et de combiner tous les types d'informations provenant d'une même zone du champ visuel (couleur, contraste, contour, fréquence spatiale, profondeur et mouvement). Cette information est ensuite transmise au cortex visuel secondaire puis aux aires associatives situées plus en avant dans le cortex. Les aires visuelles associatives assurent l'intégration entre les signaux visuels et ceux provenant d'autres modalités sensorielles. On distingue classiquement deux grandes voies dédiées au traitement de l'information visuelle :

- la voie ventrale, dans le lobe temporal, responsable de l'identification des objets et de leurs attributs (forme, couleur...).

- la voie dorsale qui s'étend vers le lobe pariétal et dont la fonction principale serait d'assurer le guidage spatio-temporel des mouvements vers les objets en traitant les informations relatives à leur position, taille et orientation.

En plus de la voie rétino-géniculo-corticale, il a été mis en évidence près d'une dizaine d'autres voies visuelles. Certaines partent des CGL et rejoignent directement les aires associatives sans passer par V1. D'autres quittent la voie principale après le chiasma optique sans passer par les CGL, et rejoignent des structures sous-corticales : ce sont les voies visuelles dites « secondaires ».

1-1-3-3 – Les voies visuelles secondaires

La voie secondaire la plus importante est la voie rétino-tectale qui représente environ 10% des fibres du tractus optique. Cette voie quitte le tractus optique, passe par le mésencéphale, principalement au niveau du **colliculus supérieur**, et se projette sur les noyaux des nerfs oculomoteurs. Le colliculus supérieur est une structure paire qui reçoit, sur ses couches supérieures, des fibres provenant de la rétine et des aires corticales visuelles et, sur ses couches intermédiaires, des fibres provenant notamment des systèmes somatosensoriel et auditif et du colliculus controlatéral ([Lund, 1972](#)). Il a pour fonction d'intégrer les informations d'origine visuelle et non visuelle et de programmer un mouvement des yeux (saccade), ou de la tête, dans le but d'orienter le regard vers un stimulus périphérique (cf. [1-3-1-3](#)). Comme les autres structures du système visuel, il est organisé de manière rétinotopique : l'activation d'une population de neurones des couches supérieures du colliculus entraîne une saccade vers un point correspondant du champ visuel ([Robinson, 1972](#)). D'autres cellules ganglionnaires de la rétine se connectent à des structures sous-corticales impliquées dans le réflexe pupillaire (pretectum), la stabilisation du regard (système optique accessoire) et la régulation des rythmes circadiens (noyaux suprachiasmatiques).

Les particularités fonctionnelles des neurones, leur organisation, ainsi que les connexions qu'ils établissent varient en fonction de la zone de la rétine à laquelle ils correspondent. Ces différences, résumées dans le Tableau 1.1, expliquent la distinction que l'on peut faire entre vision centrale et vision périphérique.

	Vision centrale	Vision périphérique
Champ visuel	Réduit (de 0° à 6° pour la macula)	Étendu (de 6° à 90° en temporal)
Rétine	Macula (∅ 5,5 mm)	Rétine périphérique (∅ 42 mm) Présence de la papille optique
Photorécepteurs	Cônes (petite taille)	Bâtonnets (grande taille)
Connexions	Peu convergentes	Très convergentes
Cellules ganglionnaires	Type P : - Nombreuses - Petite taille - Petite arborisation dendritique - Activité tonique	Type M : - Moins nombreuses - Grande taille - Grande arborisation dendritique - Activité phasique
Voie visuelle primaire (CGL)	Couches dorsales Voie Parvocellulaire	Couches ventrales Voie Magnocellulaire
Cortex visuel	Cortex visuel postérieur Fort FMC*	Cortex visuel antérieur Faible FMC*
Particularités fonctionnelles	Sensibilité aux forts contrastes lumineux et aux hautes fréquences spatiales (discrimination des détails) Vision photopique Vision des couleurs	Sensibilité aux faibles contrastes lumineux et aux basses fréquences spatiales Vision scotopique Détection des mouvements

*FMC = Facteur de Magnification Corticale

Tableau 1.1 – Tableau récapitulatif des différences entre système visuel central et périphérique.

1-2 – PHYSIOLOGIE DES MOUVEMENTS OCULAIRES

Lorsque nous voulons explorer une scène visuelle ou lire un texte nous devons alterner des déplacements rapides du regard dirigés vers des zones d'intérêt, ou « saccades », et des périodes dites de « fixations », durant lesquelles nous maintenons notre regard stable afin de pouvoir extraire l'information visuelle disponible ([Javal, 1878](#)). Les mouvements oculaires et les structures permettant de les générer font donc partie intégrante du système visuel. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous expliquerons comment sont générés les mouvements oculaires, en allant des muscles extraoculaires jusqu'aux structures corticales, puis nous décrirons les différents types de mouvements oculaires en détaillant les deux grandes composantes de l'exploration visuelle : les saccades et les fixations.

1-2-1 – Le contrôle oculomoteur

1-2-1-1 – Les muscles extraoculaires

Chaque œil est muni de 3 paires de muscles extraoculaires ayant pour fonctions de garder l'œil stable dans l'orbite à l'état de repos et de générer des mouvements de rotation du globe oculaire dans toutes les directions de l'espace (cf. Figure 1.5). Ces muscles sont :

- les muscles droits médian et latéral assurant les mouvements horizontaux, vers l'axe nasal (adduction) ou vers l'extérieur (abduction),
- les muscles droits supérieur et inférieur assurant mouvements verticaux,
- les muscles obliques inférieur (ou petit oblique) et supérieur (ou grand oblique) assurant les mouvements verticaux et les mouvements de torsion.

Les paires de muscles fonctionnent de manière synergique : pour que l'œil bouge, la contraction d'un muscle doit s'accompagner de l'extension du muscle opposé, dit « antagoniste ». De plus, dans le cas d'un mouvement binoculaire, les muscles des deux yeux vont devoir se contracter au même moment et de manière symétrique afin de placer les deux axes visuels sur la même cible. La génération d'une saccade horizontale, à droite par exemple, va donc nécessiter l'envoi d'une commande motrice à quatre muscles de manière simultanée : contraction des muscles droit latéral droit et droit médian gauche et extension des muscles droit médian droit et droit latéral gauche ([Purves et al., 2001](#)).

1-2-1-2 – Les noyaux moteurs

La commande motrice est envoyée aux muscles extraoculaires par trois nerfs craniaux provenant de trois noyaux moteurs situés dans le tronc cérébral (cf. Figure 1.5):

- le nerf abducens (VI) qui va du noyau abducens au muscle droit latéral,
- le nerf trochléaire (IV) qui part du noyau trochléaire et innerve le muscle oblique supérieur de l'œil opposé,
- le nerf oculomoteur (III) qui part du noyau oculomoteur et innerve les quatre autres muscles (muscles droits médian, supérieur et inférieur et muscle oblique inférieur).

L'activation et l'inhibition des différents noyaux vont déterminer **le sens du mouvement oculaire**. Dans le cas d'une saccade horizontale à droite, l'activation du noyau abducens droit va entraîner la contraction du muscle droit latéral droit, mais aussi celle du muscle droit médian controlatéral, par l'intermédiaire d'une connexion avec le noyau oculomoteur gauche. La commande inverse (inhibitrice) sera envoyée par le noyau abducens gauche (cf. Figure 1.6).

Le taux de décharge des motoneurons des noyaux moteurs est quant à lui responsable de la vitesse et de la durée du mouvement, et par conséquent, de **son amplitude**. La génération d'une saccade comprend deux phases : une phase de déplacement rapide vers la cible et une phase de maintien de la position de fixation.

- Durant la phase de déplacement, les motoneurons vont décharger de façon rapide et phasique (phase « pulse », 80 décharges/seconde en moyenne pendant quelques millisecondes). Cela va entraîner une contraction (ou une extension) rapide des muscles et le déplacement de l'œil dans l'orbite. La vitesse du déplacement sera proportionnelle à la fréquence du « pulse », et sa durée, proportionnelle à la durée du « pulse ».

- Durant la deuxième phase (phase « step »), les motoneurons vont décharger de manière tonique avec un taux de décharge proportionnel à la position de l'œil dans l'orbite. Ceci va imposer aux muscles extraoculaires une force de contraction juste suffisante au maintien de la position de fixation ([Leigh & Kennard, 2004](#)).

Figure 1.5 – Schéma des muscles extraoculaires et de leur innervation.

Le nerf IV part du noyau abducens (pont du mésencéphale) pour innerver le muscle droit latéral. Le nerf IV part du noyau trochléaire, sort par la face dorsale du mésencéphale et innerve le muscle oblique supérieur controlatéral. Le nerf III part du noyau oculomoteur (toit du mésencéphale) et innerve les 4 muscles oculaires restants (droits inférieur, supérieur et médian et oblique inférieur). Modifié depuis ([Purves et al., 2001](#))

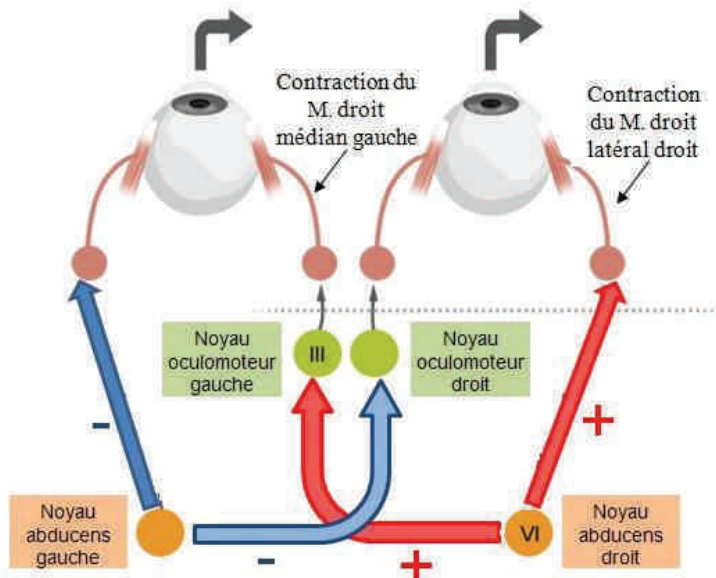
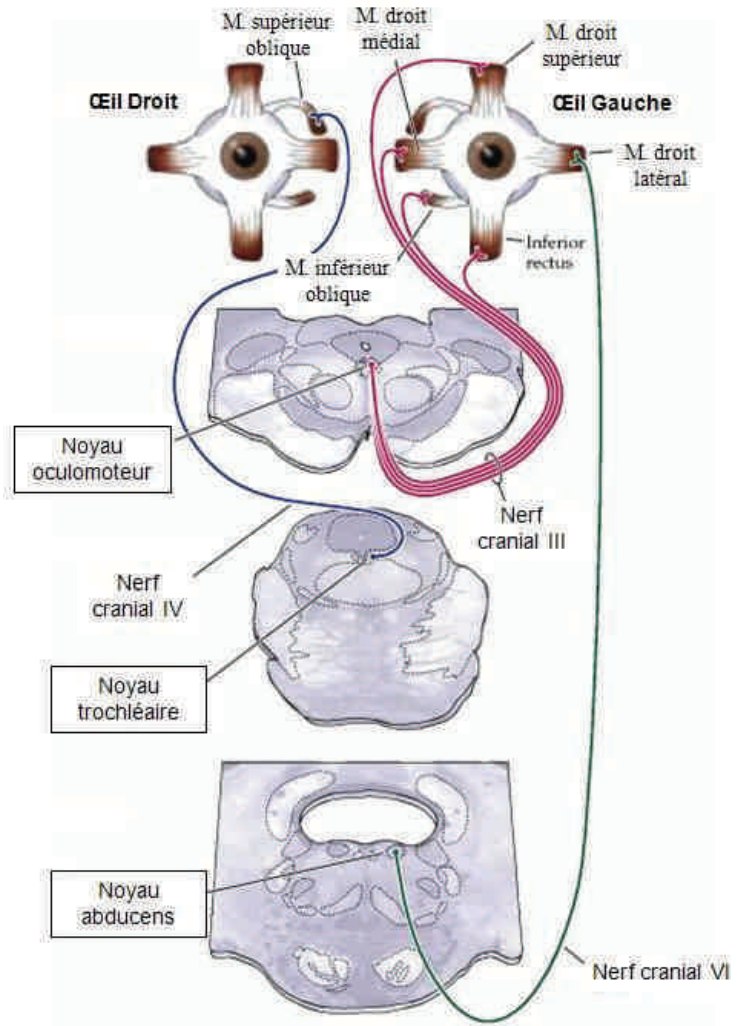


Figure 1.6 – Contrôle de la commande motrice au niveau des noyaux moteurs lors d'une saccade à droite. Le noyau abducens droit entraîne la contraction simultanée du muscle droit latéral droit (via le nerf VI) et du muscle droit médian gauche (via l'activation du noyau oculomoteur gauche). L'inhibition du noyau abducens controlatéral entraîne l'extension des muscles antagonistes. Modifié depuis www.eyebrianpedia.com/

L'activité des trois noyaux moteurs est contrôlée par des structures mésencéphaliques contenant des neurones prémoteurs spécifiques de chaque type de décharge et de mouvement : des neurones prémoteurs excitateurs (ou EBN pour « Excitatory Burst Neurons ») ou inhibiteurs (IBN, « Inhibitory Burst Neurons ») qui déchargent pendant la phase « pulse », et des neurones prémoteurs dits « omnipauses » qui agissent durant les phases « step » en inhibant les EBN et les IBN pour maintenir la fixation ([Sparks, 2002](#); [Goffart, 2009](#)). Les connexions entre ces structures permettent de coordonner l'activité des noyaux moteurs et de générer des saccades obliques impliquant l'activation simultanée de tous les muscles extraoculaires.

1-2-1-3 – Le colliculus supérieur et les autres aires de contrôle

Le colliculus supérieur est une structure laminaire située dans le mésencéphale, proche du noyau oculomoteur. Comme nous l'avons vu précédemment (cf. [1-1-3-3](#)) couches superficielles reçoivent des informations sensorielles visuelles : des projections provenant directement de la rétine (voie rétinotectale) et organisées de manière rétinotopique et des projections provenant des cortex visuels primaire et secondaire. Les expériences menées en électrophysiologie chez l'animal ([Goldberg & Wurtz, 1972](#); [McIlwain, 1982](#)) ont montré que les neurones sensoriels du colliculus étaient sensibles à une zone spécifique du champ visuel et que la taille et l'orientation de leur champ récepteur variaient en fonction de la position de cette zone : plus la position moyenne codée par un neurone est excentrée, plus le champ récepteur du neurone est large. On a donc, au niveau du colliculus, comme au niveau du cortex primaire (voir section [1-1-3-2](#)), une surreprésentation de la zone fovéale au détriment de la zone périphérique du champ visuel. La valeur exacte du facteur de magnification est difficile à déterminer chez l'homme car le colliculus supérieur est une structure profonde, de petite taille et difficile d'accès. Cependant, même si les études menées chez l'animal montrent une grande variabilité selon les espèces (voir [Rosa & Schmid, 1995](#)), le modèle implémenté chez le primate par Ottes et al. ([1986](#)) peut être considéré comme une bonne estimation de la structure colliculaire chez l'homme. Ce modèle prédit une diminution logarithmique du facteur de magnification corticale en fonction de l'excentricité rétinienne de la cible ; à titre indicatif, une cible d'un degré de largeur activera une zone colliculaire d'environ 0,45mm si elle est présentée au niveau de la fovéa et d'environ 0,20mm si elle est présentée à 10° d'excentricité horizontale. Les couches profondes du colliculus supérieur, contiennent, elles,

plusieurs types de neurones dont l'activité est corrélée à la préparation ou à la génération des saccades (pour une revue voir [Moschovakis, 1996](#)), et l'information motrice y est codée non pas de manière rétinotopique mais de manière vectorielle: l'activation d'une population localisée de neurones moteurs va entraîner une saccade ayant une direction et une amplitude données quelle que soit la position d'origine de l'œil dans l'orbite ([Sparks et al., 1976](#)). De manière réciproque, un neurone ne va pas s'activer pour une seule direction et/ou une amplitude de saccade donnée mais pour une gamme de directions et d'amplitudes voisines. Ces gammes d'activation, appelées champs de mouvement par analogie avec les champs récepteurs des neurones sensoriels, ont aussi une taille qui augmente avec l'amplitude moyenne pour laquelle les neurones s'activent (donc avec l'excentricité de la cible). Selon certains auteurs il y aurait aussi, dans la partie rostrale du colliculus, des neurones qui déchargent durant les périodes de fixation et sont inactifs durant les saccades ([Munoz & Wurtz, 1992, 1993](#)). Ces neurones auraient notamment un effet excitateur sur les neurones omnipauses impliqués dans le maintien de la fixation. Il est à noter néanmoins que l'existence de neurones de fixation au niveau du colliculus supérieur reste discutée (e.g. [Krauzlis et al., 1997](#)) et que le centre de la fixation se situe plus vraisemblablement au niveau de la région omnipause. Selon plusieurs auteurs, l'alternance entre saccades et fixations serait le résultat d'une balance d'activation/inactivation entre les neurones de saccade et les neurones de fixation reliés entre eux par des connexions latérales inhibitrices (e.g. [Findlay & Walker, 1999](#)). L'activité des neurones du colliculus est aussi régulée par des structures corticales et sous-corticales liées aux comportements volontaires, comme notamment le champ oculomoteur frontal (ou «*frontal eye field*») impliqué dans l'exécution de saccades volontaires vers des positions mémorisées à l'avance ou vers des cibles considérées comme plus pertinentes que d'autres.

Les neurones des couches profondes du colliculus se projettent sur les noyaux moteurs ainsi que sur les structures mésencéphaliques qui les contrôlent ([Grantyn & Grantyn, 1982](#)). Le rôle principal du colliculus supérieur est donc d'intégrer les informations relatives à la position d'une cible visible et de générer une commande motrice permettant d'effectuer une saccade vers cette cible ou de maintenir la fixation sur la cible. Mais le rôle du colliculus ne se limite pas au système visuel. En effet, c'est une structure intégrative qui reçoit, au niveau de ses couches intermédiaires, des afférences provenant de structures associatives impliquées dans les autres modalités sensorielles. De ce fait, même si la fonction principale du colliculus est la génération de saccades vers une cible visuelle, certains de ses neurones peuvent

s'activer lors d'une saccade vers un stimulus d'une autre nature, auditif par exemple ([Jay & Sparks, 1987](#)). De ses couches intermédiaires partent également des projections vers d'autres centres de contrôle du mouvement (formation réticulée médullaire pour les mouvements de la tête, par exemple) et vers la moelle épinière. Il a notamment été montré qu'une stimulation du colliculus supérieur n'entraînait pas seulement des mouvements des yeux, mais des mouvements d'orientation plus complexes, impliquant les yeux, la tête et le corps ([Wurtz & Albano, 1980](#), pour une revue voir [May, 2006](#)).

1-2-2 – Les différents types de mouvements oculaires

La mise en jeu des structures du contrôle oculomoteur va nous permettre d'explorer notre environnement en portant notre regard sur les cibles d'intérêt mais aussi de maintenir notre regard le plus stable possible. On distingue généralement les saccades et les fixations, des mouvements dits « réflexes », que nous effectuons de manière non consciente dans le but de stabiliser l'image sur la rétine lorsque nous bougeons ou lorsque la cible se déplace. Parmi les mouvements oculaires réflexes, on distingue : (1) le réflexe vestibulo-oculaire, qui permet de compenser les mouvements de la tête et de garder l'image stable sur la rétine lorsque l'on bouge, (2) la poursuite lente, qui est un mouvement de dérive ayant pour but de maintenir un objet en mouvement sur la fovéa, et (3) les mouvements de vergence (convergence et divergence) permettant d'ajuster l'orientation du regard en fonction de la profondeur d'une cible. Tout en gardant à l'esprit l'importance de ces mouvements oculaires dans la perception visuelle, notre étude va se limiter à l'étude des deux principaux types de mouvements mis en jeu lors de l'exploration visuelle et de la lecture que sont les fixations et les saccades.

Les **saccades** sont des mouvements volontaires, rapides (de l'ordre de la dizaine de millisecondes) et d'amplitude variable, utilisés pour l'exploration du champ visuel. Elles ont pour but de placer la cible à identifier sur la zone de la rétine ayant la meilleure résolution, donc dans le cas de la vision normale, sur la fovéa. Leurs caractéristiques métriques et temporelles ainsi que les facteurs qui les influencent seront détaillés dans la partie suivante ([1-2-3](#)). Avec une vitesse pouvant atteindre 900° /seconde, les saccades sont les mouvements les plus rapides produits par le corps humain, mais lorsque nous bougeons les yeux nous ne percevons cependant aucun mouvement ni aucun flou de l'image. La stabilité de l'image est assurée par le système visuel grâce à un mécanisme appelé « suppression saccadique » ([Dodge, 1900](#)), qui va réduire, sans pour autant totalement supprimer ([Castet, 2010](#)), la

perception visuelle durant la saccade. L'information visuelle est donc extraite seulement pendant les périodes de fixations.

Durant les **fixations**, notre regard se stabilise afin de pouvoir extraire l'information disponible dans le champ visuel, principalement au niveau de la fovéa. Néanmoins, la période de fixation n'est pas comme on pourrait le penser une phase durant laquelle les yeux sont totalement immobiles; elle est plutôt la résultante d'une combinaison de plusieurs mouvements involontaires de très faible amplitude (cf. Figure 1.7a) :

- les microsaccades, ayant les mêmes caractéristiques que les saccades mais d'amplitude plus faible (de 0.5 à 1 degré).
- les dérives et micro-dérives, mouvements lents et continus de l'œil pouvant avoir une trajectoire curviligne.
- les micro-tremblements, oscillations rapides et de faible amplitude pouvant avoir lieu durant les dérives.

Bien que les rôles respectifs de ces trois types de mouvements soient encore discutés (pour une revue voir [Martinez-Conde et al., 2004](#)), on peut dire que leurs deux principales fonctions sont de stabiliser le regard sur la cible afin de pouvoir en extraire l'information, mais aussi d'éviter l'estompage de l'image rétinienne lors de la fixation (« fading » en anglais; [Coppola & Purves, 1996](#) ; [Martinez-Conde et al., 2004](#)). L'effet de fading se produit lorsque le regard est immobile et que les neurones sont activés de façon prolongée par un stimulus constant, ce qui entraîne une habituation des neurones et, au bout d'un certain temps, la disparition de l'image. L'effet Troxler est un exemple naturel de fading qui se produit en vision périphérique, lorsque l'on fixe un point central et que l'on porte notre attention vers une cible excentrée (cf. Figure 1.7b). Au niveau de la fovéa en revanche, cet effet n'est pas présent en conditions normales, mais il peut être obtenu expérimentalement en maintenant l'image rétinienne totalement stable de manière artificielle. Les expériences de stabilisation rétinienne ont montré qu'en l'absence totale de mouvements oculaires, l'image fovéale pouvait disparaître en quelques secondes ([Pritchard, 1961](#)) voire en une centaine de millisecondes seulement ([Coppola & Purves, 1996](#)).

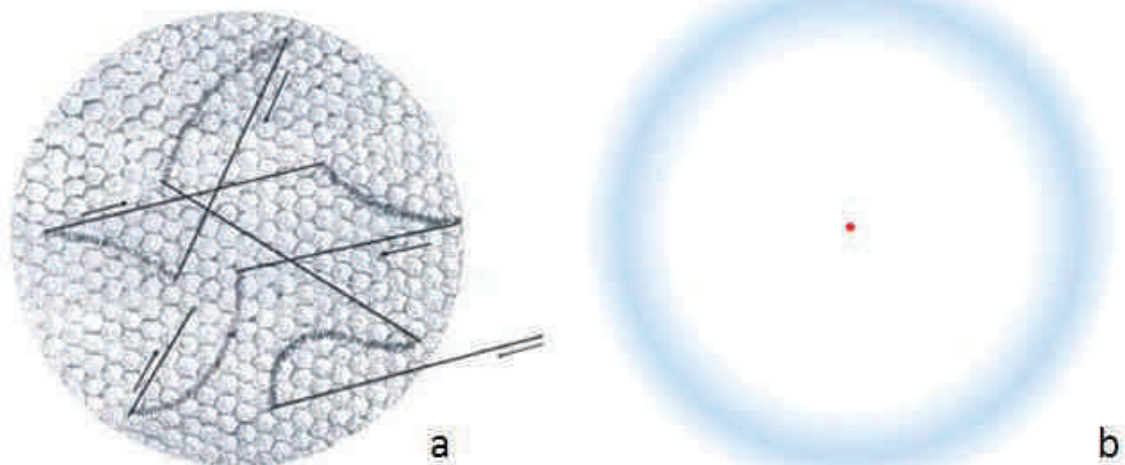


Figure 1.7– a) Les différents types de mouvements oculaires mis en jeu lors de la fixation représentés sur une portion de la fovéa ($\text{Ø}=0,05\text{mm}$). Les lignes courbes résultent de la combinaison de dérives et de micro-tremblements. Les lignes droites représentent les microsaccades, plus rapides.
 b) Un exemple de fading : l'effet Troxler. Lorsque l'on fixe le point central tout en gardant son attention sur l'anneau périphérique, les contours de l'anneau s'estompent progressivement.
 Modifié depuis Martinez-Condé et al. (2004).

1-2-3 – Propriétés des saccades

1-2-3-1 – Caractéristiques métriques et temporelles des saccades

Les saccades possèdent plusieurs caractéristiques mesurables, certaines étant relativement invariantes comme leur vitesse ou leur durée, et d'autres, telles que leur amplitude ou leur latence, pouvant varier en fonction de facteurs exogènes (taille et position du stimulus, configuration visuelle) ou endogènes (tâche à effectuer, attention, différences interindividuelles).

L'amplitude d'une saccade est la distance angulaire parcourue par l'œil durant le mouvement. Elle peut se mesurer en degrés, en minute d'arc ($1\text{mn d'arc} = 1/60^{\text{ème}}$ de degré), ou dans le cas particulier de la lecture, en nombre de lettres ou de caractères (cf. Chapitre 2). On exprime la précision d'une saccade en terme de gain (rapport amplitude de la saccade / excentricité de la cible) ou d'erreur de visée (différence entre la position d'atterrissage de l'œil et la position du stimulus). Une saccade trop courte est dite « hypométrique » et a donc un gain négatif, tandis qu'une saccade trop longue est dite « hyperométrique » et a un gain positif. Dans le cas d'une cible ponctuelle présentée de façon isolée, les saccades ont

tendance à être légèrement hypométrique et cela d'autant plus qu'elles se dirigent vers une cible plus excentrée, mais c'est surtout dans le cas de configurations visuelles plus complexes (changement de position de la cible durant la saccade ou présence de distracteurs) que l'on observe une imprécision importante.

La vitesse moyenne et la durée d'une saccade sont des caractéristiques relativement invariantes, qui augmentent toutes deux avec l'amplitude de la saccade (cf. Figure 1.8a). Lors d'une saccade, la vitesse instantanée de l'œil augmente brusquement, atteint un pic à mi-parcours, puis diminue de façon quasi symétrique jusqu'à stabilisation de l'œil. Pour les saccades inférieures à 60°, la valeur du pic de vitesse augmente aussi avec leur amplitude (300 degrés/seconde pour une saccade de 10°, cf. Figure 1.8b). Il existe une relation linéaire caractéristique entre l'amplitude d'une saccade et le produit de sa vitesse maximale par sa durée ; cette relation est appelée communément « séquence principale » ou « *main sequence* » en anglais ([Bahill et al., 1975](#)) : plus une saccade est grande, plus sa vitesse et sa durée sont importantes (cf. Figure 1.8c). Cette relation peut cependant varier légèrement en fonction des individus, de la nature du stimulus ou de la tâche à effectuer (pour une revue cf. [Goffart, 2009](#)). Le système oculomoteur a pour but d'effectuer les mouvements les plus rapides et les plus précis possible, mais l'augmentation de la vitesse des saccades entraîne aussi une diminution de leur précision. Ce phénomène de balance entre vitesse et précision est connu sous le nom de « *Speed-Accuracy trade-off* » ([Abrams et al., 1989](#)). Selon Harris et Wolpert ([2006](#)), la *main sequence* serait le meilleur compromis permettant une précision et une vitesse optimale pour une amplitude de saccade donnée.

La latence d'une saccade est le temps nécessaire pour sélectionner une cible périphérique, programmer un mouvement vers cette cible et exécuter la commande motrice correspondante. Ce délai est difficile à évaluer en conditions d'exploration visuelle naturelles car chaque temps de pause du regard (ou fixation) comprend non seulement la latence du mouvement mais aussi le temps de traitement de l'information fovéale. La latence d'une saccade peut en revanche se mesurer de façon précise dans le cadre d'une tâche simple de visée de cible périphérique dans laquelle le sujet doit fixer un stimulus central puis effectuer une saccade vers une cible apparaissant à une excentricité variable ; elle se définit alors comme le temps de réaction entre l'apparition du stimulus périphérique et le déclenchement du mouvement. Dans de telles conditions expérimentales la latence moyenne d'une saccade est comprise entre 150 et 200 ms, mais on observe une grande variabilité dans les mesures obtenues en fonction du paradigme utilisé (cf. [1-2-3-3](#)).

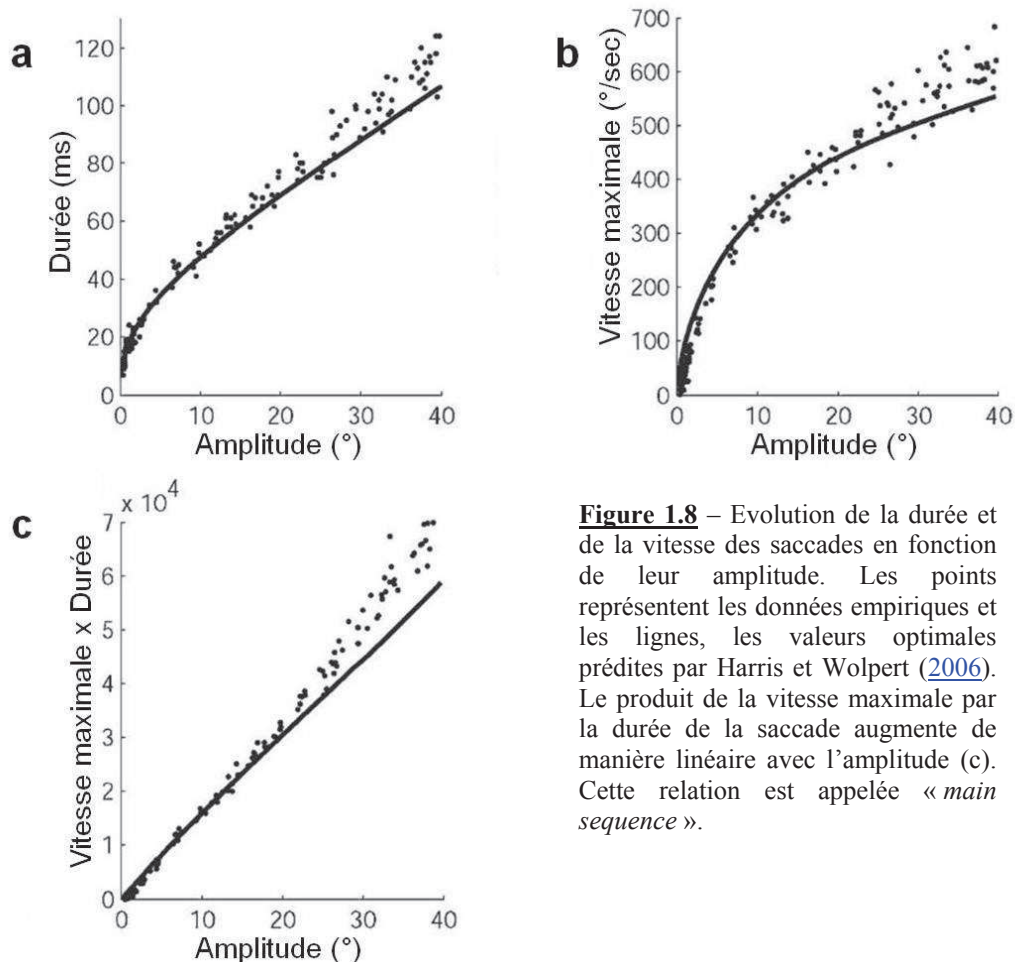


Figure 1.8 – Evolution de la durée et de la vitesse des saccades en fonction de leur amplitude. Les points représentent les données empiriques et les lignes, les valeurs optimales prédites par Harris et Wolpert (2006). Le produit de la vitesse maximale par la durée de la saccade augmente de manière linéaire avec l'amplitude (c). Cette relation est appelée « *main sequence* ».

1-2-3-2 – Saccades réflexives et saccades volontaires

Bien que toutes les saccades soient des mouvements oculaires volontaires, on fait souvent la distinction entre les saccades dites « réflexives » et les saccades dites « volontaires ». **Les saccades réflexives** sont des mouvements oculaires déclenchés lors de l'apparition inattendue d'un stimulus visuel périphérique. Elles sont caractérisées par des latences brèves, inférieures à 200 ms (Gilchrist, 2011), et dans certaines conditions expérimentales comme le paradigme du "gap" (voir 1-2-3-3), leur latence peut même être de l'ordre de 100-120 ms ; on parle alors de saccade « express ». Les saccades réflexives sont aussi qualifiées « d'exogènes » car leur caractéristiques, et en particulier leur latence, sont principalement influencées par des facteurs visuels, telles que l'apparition d'un stimulus en périphérie ou l'extinction du point de fixation. **Les saccades volontaires** se définissent comme des mouvements oculaires en direction d'un but choisi et ont par conséquent une latence plus longue qui témoigne d'un contrôle cognitif plus important (250 à 350 ms selon le

paradigme). Les structures cérébrales mises en jeu pour la génération des saccades volontaires sont les mêmes que pour les saccades réflexives, mais certaines montrent une activité différente selon le type de saccade effectué. Les études d'imagerie cérébrale montrent, par exemple, une activation moins forte du cortex visuel, et au contraire, une activation plus importante des cortex préfrontaux et pariétaux lors des saccades volontaires que lors des saccades réflexives (pour une revue voir [McDowell et al., 2008](#)). L'amplitude et la latence de ces saccades sont plutôt influencées par des facteurs endogènes tels que la prédictibilité de la position de la cible, l'orientation attentionnelle ou la tâche à effectuer.

1-2-3-3 – Facteurs influençant la latence et la précision des saccades

Comme nous l'avons dit, la latence et la précision des saccades sont des caractéristiques variables pouvant être influencées par des facteurs exogènes liés aux conditions d'affichage des stimuli, mais aussi à des facteurs endogènes dépendant des performances du sujet ou de la tâche à effectuer.

Les paradigmes manipulant le temps d'affichage du point de fixation permettent de rendre compte de l'effet d'une **stimulation visuelle fovéale** sur la latence des saccades. Dans le paradigme classique dit de « *step* », le point de fixation disparaît au moment de l'apparition du stimulus périphérique, mais il est possible d'introduire un délai entre l'effacement du point de fixation et l'affichage du stimulus (paradigme de « *gap* ») ou au contraire, de laisser le point de fixation affiché durant toute la durée de l'essai (paradigme d'« *overlap* »). Les expériences comparant ces trois conditions (pour revue cf. [Fischer & Weber, 1993](#)) ont mis en évidence des latences plus courtes dans la condition de « *gap* » et plus longues dans la condition d'« *overlap* » par rapport à la condition classique (« *step* »). Les auteurs expliquent cette différence au niveau des temps de réaction par la disparition du point de fixation qui permettrait non seulement un désengagement attentionnel ([Fischer et al., 1993](#)) et/ou une baisse de l'activité de fixation ([Findlay & Walker, 1999](#)) plus précoce qu'en conditions *step* et *overlap*, mais aussi une préparation motrice et/ou temporelle ([Ross & Ross, 1980](#); [Rolf & Vitu, 2007](#)).

Lorsqu'une cible est présentée seule, la latence des saccades peut être influencée par son excentricité, sa taille ou sa luminance. L'**excentricité** du stimulus influence à la fois la latence et la précision des saccades. La latence est minimale pour des excentricités comprises entre 1° et 15°, et augmente lorsque les cibles sont présentées dans la partie centrale de la

fovéa ($\leq 1^\circ$) ou en grande périphérie ([Kalesnykas & Hallett, 1994](#)). La précision des saccades, quant à elle, diminue lorsque l'excentricité de la cible augmente. On observe en moyenne une sous-visée de la cible d'environ 10% de son excentricité. Ceci peut être interprété en termes de stratégie d'économie oculomotrice ; en effet, le système favoriserait les saccades hypométriques car il serait moins coûteux d'effectuer une saccade corrective dans la même direction que la saccade principale, ou bien encore lorsque le stimulus cible reste dans le même hémichamp après l'exécution de la saccade principale. Mais il est aussi possible que cette relation entre l'erreur de visée et l'excentricité de la cible soit le résultat, au moins en partie, d'un **effet de gamme**. Cet effet, mis en évidence par Kapoula ([1985](#)), suggère que l'erreur de visée ne serait pas proportionnelle à l'excentricité absolue de la cible mais à sa position dans la gamme des excentricités possibles. Dans un même bloc d'essais par exemple, les cibles les plus proches ont tendance à être sur-visées et les plus éloignées sous-visées, et ce, quelle que soit leur excentricité absolue. L'existence de cet effet est toutefois controversée car plusieurs études utilisant des paradigmes similaires ne rapportent pas d'effet de gamme ([Findlay, 1982](#); [Nuthmann et al., \(in prep.\)](#) et voir Chapitre 2, 2-4-3-2). Il a aussi été montré que la latence était réduite pour les stimuli plus grands, plus lumineux ou ayant une fréquence spatiale plus faible ([Ludwig et al., 2004](#)). L'effet de la **taille du stimulus** sur la latence et la métrique des saccades est cependant encore sujet à discussion. Ploner et al. ([2004](#)) rapportent par exemple, une augmentation de la latence et de la dispersion des saccades ainsi qu'une diminution de leur amplitude moyenne lorsque la taille du stimulus augmente, tandis que les résultats obtenus par Kowler et Blaser ([1995](#)) ne mettent en évidence aucun effet de la taille du stimulus sur la latence ou l'amplitude moyenne des saccades ([Kowler Eileen & Blaser, 1995](#)).

L'effet de la complexité de la scène visuelle se mesure généralement en ajoutant lors de la présentation de la cible, un autre stimulus, le plus souvent un **distracteur** que le sujet a pour consigne d'ignorer. Pour pouvoir réaliser cette tâche, le système oculomoteur va devoir, dans certains cas, inhiber une saccade réflexive vers le distracteur pour pouvoir aller fixer la cible, ce qui va se manifester par une diminution de la précision et/ou de la rapidité de la saccade volontaire. Les premières observations de l'effet d'un stimulus additionnel sur les latences des saccades ont été faites par Lévy-Schoen ([1969](#)) dans des conditions où deux cibles étaient présentées simultanément sur l'axe horizontal, soit dans le même hémichamp, soit dans des hémichamps opposés. Son expérience a révélé que les latences de saccades étaient plus importantes lorsque les deux stimuli apparaissaient dans des hémichamps opposés

que lorsqu'une seule cible était présentée ou bien lorsqu'elle était accompagnée d'une autre cible, ipsilatérale. Depuis, cet effet a été répliqué dans de nombreuses études, et on le qualifie d'effet de distracteur éloigné (ou « *remote distractor effect* » en anglais; [Walker et al., 1997](#); pour une revue voir [Casteau & Vitu, 2012](#)). Il s'avère en effet, que la latence des saccades est augmentée non seulement lorsque la cible est présentée avec un distracteur controlatéral, mais aussi lorsque le distracteur apparaît dans le même hémichamp que la cible en dehors d'une zone de +/- 20° autour de l'axe de la cible. A contrario, lorsque le distracteur apparaît au sein de cette zone, la latence des saccades n'est pas modifiée, mais leur précision est affectée comme mis en évidence initialement par Coren et Hoenig ([1972](#)), puis par Findlay ([1982](#)). Ce dernier a montré que lorsque l'on demande aux participants de fixer consécutivement deux cibles présentées sur le même axe horizontal et dans le même hémichamp visuel, une proportion importante des saccades initiales montrent une amplitude intermédiaire et atterrissent entre les deux cibles, au niveau du centre de gravité de la configuration visuelle. Ce phénomène appelé « **effet global** » ou « effet du centre de gravité » a depuis été répliqué de nombreuses fois avec certaines variantes selon le paradigme utilisé (pour une revue voir [Vitu, 2008](#)). Il dépend des caractéristiques visuelles du distracteur et de la cible ; le regard a tendance à atterrir plus près des stimuli les plus saillants visuellement, qu'ils soient plus grands ([Findlay, 1982](#)) ou plus lumineux ([Deubel et al., 1984](#)). L'effet global, présent pour les stimuli visuels simples, se retrouve dans des tâches d'identification de lettres ([Coëffé & O'Regan, 1987](#); [Jacobs, 1987](#)) et de mots ([Vitu, 1991b](#)) ce qui en fait un phénomène important dans la compréhension des mécanismes des mouvements oculaires durant la lecture (cf. Chapitre 2).

Enfin, la latence des saccades peut aussi être influencée par des **facteurs endogènes**. Il a été montré qu'elle était réduite lorsque la position de la cible était prédictible ou indicée ([Kowler Eileen, 1990](#); [Rolfs & Vitu, 2007](#)). Par ailleurs, comme le suggèrent plusieurs données, il est possible de moduler la latence et la précision des saccades en modifiant la tâche à effectuer (pour une revue voir [Kowler Eileen, 1990](#)). Findlay & Kapoula ([1992](#)) ont montré, par exemple, que lorsque les sujets avaient pour consigne de fixer la cible le plus précisément possible mais sans contrainte de rapidité, la précision des saccades était améliorée tandis que leur latence augmentait. La latence des saccades est d'autre part fortement augmentée, et la précision diminuée, lorsque les sujets doivent effectuer une saccade dans la direction opposée à celle de la cible (anti-saccades) ou encore lorsque le stimulus disparaît avant le déclenchement de la saccade (saccades mémorisées).

CHAPITRE 2 : LA LECTURE EN VISION NORMALE

La lecture est une activité complexe consistant à identifier et interpréter les stimuli visuels perçus durant une fixation, mais aussi à déplacer le regard de manière adéquate afin de pouvoir lire un texte dans son intégralité. Elle constitue donc un vaste sujet d'étude rassemblant de nombreux domaines de la psychologie cognitive tels que la psychophysique, la linguistique ou l'oculomotricité. Nous présenterons tout d'abord dans ce chapitre certains des aspects orthographiques et lexicaux de la reconnaissance de mots, de l'identification des lettres au codage lexical ainsi que les modèles de la psychophysique reposant exclusivement sur le codage orthographique. Bien que les facteurs lexicaux ne constituent pas l'aspect central de notre étude, il nous a semblé nécessaire d'en faire une description succincte, d'une part parce que, par des influences dites « top-down », ils peuvent modifier la visibilité des lettres et le comportement oculomoteur, et d'autre part, parce que certains de ces facteurs comme la longueur du mot ou la fréquence lexicale ont été contrôlés et étudiés dans nos expériences. Dans les deux sections suivantes, nous nous concentrerons sur les aspects visuels et oculomoteurs de la reconnaissance de mots. Nous y présenterons des phénomènes robustes liés aux performances de reconnaissance et au comportement oculomoteur durant la lecture et nous décrirons les principaux modèles permettant d'en rendre compte.

2-1- LE CODAGE ORTHOGRAPHIQUE ET L'ACCES AU LEXIQUE

2-1-1 – De la lettre au mot

Pour pouvoir comprendre les mécanismes mis en jeu lors de la lecture il est nécessaire de savoir quelle est la nature de l'information que nous traitons et quelle est la quantité d'information disponible lors de chaque fixation. Depuis plus de 100 ans, les chercheurs s'interrogent sur la façon dont nous reconnaissons les mots. Les analysons-nous de manière globale, « holistique », comme c'est parfois le cas pour la reconnaissance d'objets ou de visages ([Farah, 1990](#)), ou les décomposons-nous en plusieurs sous-unités ? Les premières études des performances de reconnaissance de mots favorisaient l'hypothèse holistique, notamment certains résultats montraient par exemple qu'un mot était moins bien reconnu lorsqu'on en modifiait la forme globale (pour une revue voir [Ferrand, 2007](#)). Mais d'autres

expériences suggèrent que la reconnaissance des mots passe obligatoirement par le traitement des lettres le composant, même pour les mots les plus courts et/ou les plus courants (voir aussi [Pelli et al., 2003](#)). Par conséquent, l'hypothèse la plus largement admise aujourd'hui est que (1) la lettre est l'unité de base de la lecture, que (2) la reconnaissance de lettres repose sur l'assemblage des traits visuels les composant et que (3) le traitement de toutes les lettres du mot qui ont été vues lors de la fixation se fait en parallèle.

Mais pour reconnaître un mot il ne suffit pas d'identifier les lettres qui le constituent ; il faut aussi les assembler de manière ordonnée. Il existe un système de codage de la position des lettres au sein du mot. C'est notamment grâce à ce système de codage que nous sommes capables de distinguer deux anagrammes, c'est-à-dire deux mots composés des mêmes lettres mais dans un ordre différent, comme par exemple les mots « LOIN » et « LION ». Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer ce phénomène, et les données empiriques (identification de mots avec amorçage perceptif, [Humphreys et al., 1990](#); [Grainger et al., 2006](#)) favorisent aujourd'hui l'hypothèse d'un système de codage de la position relative des lettres qui s'avère moins coûteux qu'un système reposant sur leur position absolue (première, deuxième ou n^{ième} lettre du mot). Le modèle psycholinguistique dit « à bigrammes ouverts » est un modèle de codage relatif proposé par Grainger et Van Heuven ([2003](#)). Il part du principe que la lecture d'un mot active simultanément toutes les combinaisons de deux lettres possibles avec comme seule contrainte que la position qu'elles tiennent l'une par rapport à l'autre soit conservée. Le terme « ouverts » précise que les lettres n'ont pas besoin d'être adjacentes pour former un bigramme. Le mot LOIN va donc activer six bigrammes ouverts LO, LI, LN, OI, ON et IN, mais pas OL, car le L est obligatoirement situé à gauche du O. Cet ensemble des bigrammes activés, appelé « carte des positions relatives », va ensuite être comparé à l'ensemble des mots connus (« lexique orthographique ») et activer la représentation du mot correspondant à la bonne combinaison de tous ces bigrammes. Il est important de noter que cette hypothèse n'exclut pas l'existence de mécanismes de reconnaissance de niveau supérieur, basés sur la reconnaissance de sous-unités linguistiques plus complexes telles que le graphème ([Rastle & Coltheart, 2008](#)) ou la syllabe ([Spoehr & Smith, 1973](#)).

2-1-2 – Influence des facteurs lexicaux

Un mot n'est pas un objet visuel comme un autre. C'est un assemblage de lettres qui a été appris et qui possède un sens propre. En plus des facteurs visuels que nous détaillerons plus loin, d'autres facteurs liés à la structure (morphologie et phonologie) ou au sens des mots vont en influencer la reconnaissance. Il faut garder à l'esprit que, lors de la lecture d'un texte, les mots sont prétraités en vision parafovéale avant d'être fixés (voir ci-dessous). De plus, des facteurs phonologiques (comme la rime, par exemple), sémantiques et syntaxiques peuvent entrer en jeu et agir sur les performances de reconnaissance de mots (pour revue voir [Ferrand, 2007](#)). Néanmoins, nous décrivons ici uniquement les facteurs qui interviennent lors de la lecture de mots écrits présentés de manière isolée et en vision fovéale. Nous décrivons donc les quatre principaux effets lexicaux que sont : l'effet de supériorité du mot, de la longueur du mot, de la fréquence lexicale et du voisinage orthographique.

Tout d'abord, un résultat notable et robuste est l'**effet de supériorité du mot**, qui fait que la reconnaissance d'une lettre est meilleure lorsque celle-ci est présentée au sein d'un mot que lorsqu'elle est présentée seule ou dans une chaîne de symboles ou de lettres aléatoires ([Reicher, 1969](#)). Rumelhart et McClelland ([1982](#)) ont montré que cet effet facilitateur était aussi présent, mais dans de moindres proportions, lorsque la lettre était présentée au sein d'un pseudo-mot prononçable (comme « SELT ») ou d'un non-mot non prononçable mais ressemblant visuellement à un mot réel (comme « SPCT »). Ces résultats témoignent d'une influence « top-down » des mécanismes de haut niveau, à la fois orthographiques et phonologiques, sur les mécanismes de plus bas niveau (identification des lettres). Il a aussi été montré que l'effet facilitateur ne se produit que lorsque la position de la lettre cible n'est pas connue à l'avance et que le sujet doit prêter attention à la chaîne de caractères dans sa totalité, ce qui suggère que cet effet a aussi une composante attentionnelle ([Johnston & McClelland, 1974](#)).

La **longueur du mot** (ou le nombre de lettres le composant) est un facteur pouvant moduler les performances de reconnaissance, mais son effet est difficile à étudier car il est, par nature, corrélé avec celui d'autres facteurs tels que la fréquence lexicale, le nombre de voisins orthographiques ou le nombre de syllabes. Cette complexité explique pourquoi les premières expériences portant sur l'étude la longueur des mots, que ce soit dans des tâches de décision lexicale ([Frederiksen & Kroll, 1976](#)) ou d'identification perceptive ([Howes & Solomon, 1951](#)), ont rapporté des résultats contradictoires montrant soit un effet nul soit un

effet inhibiteur du nombre de lettres sur les performances de lecture (pour une revue complète voir [New et al., 2006](#)). En [2006](#), New et al. ont réexaminé l'effet du nombre de lettres en utilisant la base de données issue de l'"English Lexicon Project" ([Balota et al., 2007](#)), un projet visant à recueillir les données de temps de dénomination et de décision lexicale de 1200 sujets sur un corpus très large de mots (40 000 aujourd'hui, cf. <http://elexicon.wustl.edu/>). En effectuant des régressions multiples permettant de mesurer l'effet de la longueur des mots lorsqu'il est décorrélé de celui des autres facteurs, les auteurs ont pu mettre en évidence un effet quadratique, en forme de « U », du nombre de lettres sur le temps de dénomination (cf. Figure 2.1) : le temps de réaction diminue à mesure que le nombre de lettres augmente, de 3 à 5 lettres, il est ensuite stable pour les mots de 5 à 8 lettres, puis augmente graduellement avec la longueur du mots (entre 8 et 13 lettres). Actuellement aucun modèle de la reconnaissance des mots ne parvient à prédire la forme de cet effet pourtant robuste.

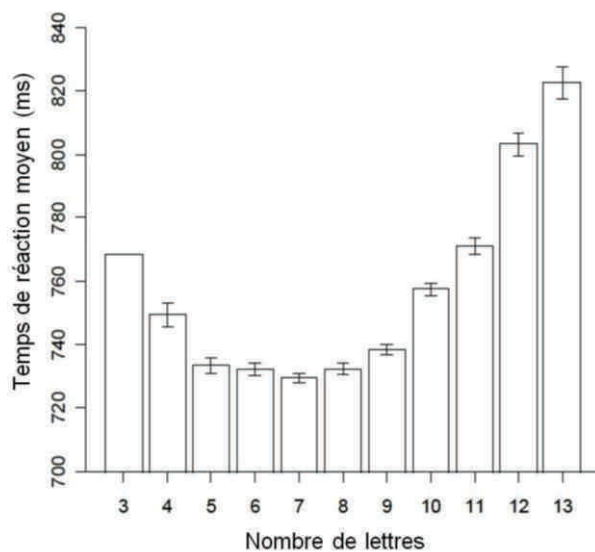


Figure 2.1- Effet du nombre de lettres sur les performances de reconnaissance des mots (temps de dénomination).

Lorsque l'effet de la longueur du mot est calculé indépendamment de l'effet des autres facteurs, on observe une courbe de performances à allure quadratique, avec des temps de réaction minimaux pour les mots compris entre 5 et 8 lettres et de moins bonnes performances pour les mots plus courts (3-5 lettres) et plus longs (8-13 lettres). [New et al., 2006](#).

La **fréquence lexicale** est une mesure permettant d'estimer la familiarité du lecteur avec un mot donné. Elle se calcule en comptant le nombre d'apparitions du mot dans un corpus de texte et s'exprime en « occurrences par million de mots ». LEXIQUE 3 (www.lexique.org) est une base de données lexicale, libre d'accès, développée par New et al. ([2001](#)) qui donne les données lexicales (catégorie grammaticales, nombre de lettres, fréquence lexicale...) pour 1350 mots tirés de 3200 extraits de romans écrits en langue française. L'effet de la fréquence a été étudié dans de nombreux travaux, notamment dans des expériences

d'indentification perceptive (e.g. [Howes & Solomon, 1951](#)) ou d'enregistrement des mouvements oculaires (e.g. [Vitu et al., 1990](#); pour des revues voir [Rayner, 1998](#); [Ferrand, 2007](#)). Toutes ces études rapportent un effet positif de la fréquence lexicale sur les performances de lecture. Plus un mot est fréquent, plus il est reconnu de manière rapide et précise, et ce quel que soit son nombre de lettres. Les techniques telles que l'enregistrement des potentiels évoqués électriques (ERP) ou la magnétoencéphalographie (MEG), permettant de connaître le déroulement temporel d'un processus montrent que les effets de fréquence apparaissent généralement aux alentours de 450 ms, lors des étapes correspondant au post-traitement sémantique ([Hauk et al., 2006](#)). Certaines études suggèrent qu'il existerait aussi des effets plus précoces de la fréquence des mots, visibles dès les étapes de sélection lexicale (100 à 200 ms), mais l'existence et l'origine de ces effets précoces sont encore assez débattues ([Holcomb & Grainger, 2006](#)).

On définit des **voisins orthographiques** comme des mots ayant toutes leurs lettres en commun sauf une, qui a été substituée (par exemple, « pomme » et « comme »), déplacée (« pilé » et « plié »), ajoutée ou soustraite (« car » et « char ») ([Coltheart et al., 1977](#); [Davis et al., 2009](#)). Les deux principales composantes liées au voisinage orthographique sont la taille du voisinage (i.e. le nombre de voisins orthographiques) et la fréquence des voisins orthographiques (i.e. le fait que les voisins soient plus ou moins fréquents que le mot cible). Ces deux facteurs ont été étudiés séparément dans plusieurs expériences et les résultats obtenus ont donné lieu à des interprétations contradictoires. Certaines études ont mis en évidence un effet facilitateur du nombre de voisins (ceux obtenus par substitution d'une lettre) sur les performances de reconnaissance ([Andrews, 1989](#); [Forster & Shen, 1996](#); [Huntsman & Lima, 2002](#)), supportant ainsi l'hypothèse selon laquelle la taille du voisinage orthographique est le facteur déterminant dans la reconnaissance de mots : plus un mot possède de voisins orthographiques, plus son activation au niveau du lexique va être facilitée et meilleures seront les performances de reconnaissance. Mais certains auteurs ont suggéré que cet effet pouvait être spécifique d'une tâche donnée ([Grainger, 1990](#); [Pollatsek et al., 1999](#)) ou encore qu'il pouvait avoir été confondu avec l'effet d'un autre facteur : la fréquence des voisins orthographiques. En effet, Grainger et al. ([1989](#)) notamment (mais voir aussi [Perea & Pollatsek, 1998](#)), ont montré que lorsque le nombre total de voisins était contrôlé, l'existence d'un voisin orthographique ayant une fréquence supérieure au mot cible avait un effet inhibiteur sur les performances de reconnaissance (augmentation des latences de décision lexicale). Leur interprétation de cet effet s'oppose à l'interprétation précédente : selon eux,

l'activation d'un mot au niveau du lexique se ferait de manière compétitive, plus il y a de candidats potentiels, et plus ces candidats sont fréquents, plus la reconnaissance du mot va être retardée.

2-1-3 – Les modèles de la psycholinguistique

Dans le domaine de la psycholinguistique, certains modèles basés uniquement sur le codage orthographique ont été proposés pour rendre compte des performances de reconnaissance de mots. Même si ces modèles ne serviront pas de support à notre étude, il nous a semblé important de les mentionner car ils permettent d'expliquer certains des effets des facteurs lexicaux que nous avons décrits précédemment. Dans ces modèles, la visibilité des lettres ainsi que la position du regard ne sont pas prises en compte mais ce choix est justifié par le fait que les mots cibles sont des mots courts (quatre lettres seulement) et que l'on considère que toutes les lettres sont vues de la même manière.

Le modèle de Recherche Sérielle de Forster (1976) suppose que la recherche d'un mot dans le lexique se fait de manière semblable à une recherche dans le dictionnaire. Dans ce modèle, l'accès au dictionnaire, ou « lexique central », peut se faire par trois entrées distinctes, l'entrée orthographique, phonologique ou sémantique, chacune étant représentée sous la forme d'un fichier d'accès périphérique. Lorsque le lecteur va identifier un mot écrit, il va utiliser uniquement le fichier d'entrée orthographique pour retrouver ce mot dans son lexique central. Chaque fichier périphérique contient la liste de tous les mots du lexique ainsi que les informations nécessaires à leur reconnaissance (signification, prononciation...). Les mots partageant les mêmes lettres initiales y sont regroupés en sous-ensembles de façon à faciliter la recherche. Ce modèle explique l'effet de fréquence par le fait que, les listes de mots sont organisées par ordre de fréquence lexicale décroissante ; l'accès aux mots les plus fréquents est donc plus rapide que l'accès aux mots de basse fréquence.

Dans **le modèle Logogène** de Morton (1969), la sélection et l'activation d'un mot se font via un système intermédiaire entre le système sensoriel et le système cognitif : le « système des logogènes » (du grec « *logos* » qui signifie discours et « *genos* », naissance). Chaque logogène est un détecteur spécifique d'un mot particulier et possède un seuil d'activation propre. Lorsqu'un mot est vu, les informations envoyées par le système sensoriel vont stimuler en parallèle tous les logogènes correspondant aux traits composant les lettres du mot et, par "propagation", tous les logogènes des lettres contenant ces traits et tous les

logogènes des mots contenant ces lettres, signifiant donc que les candidats lexicaux potentiels sont activés en parallèle, et non pas de façon sérielle comme c'est le cas dans le modèle de Foster. Le meilleur candidat, celui qui, normalement, correspond au mot cible, est parmi les mots activés, le plus actif. Si au bout d'un certain délai aucun candidat n'a atteint son seuil d'activation, le stimulus est considéré comme un non-mot. Dans ce modèle, l'effet de fréquence s'explique par le fait que les mots fréquents ont un seuil d'activation plus bas ; ils vont donc s'activer plus précocement que les mots moins fréquents. De plus, les interactions entre le système des logogènes et le système cognitif permettent d'expliquer les effets contextuels qui font qu'un mot est mieux reconnu lorsqu'il est présenté dans un contexte sémantiquement et syntaxiquement cohérent.

Comme le modèle Logogène, le **modèle à Activation Interactive** proposé par McClelland & Rumelhart (1981) repose sur l'activation en parallèle de représentations locales. Ici, les auteurs considèrent trois niveaux de représentations (cf. Figure 2.2) :

- le niveau des traits visuels, composés de 12 sous-unités (une pour chaque orientation de trait possible),
- le niveau des lettres qui contient 26 sous-unités, une pour chaque lettre de l'alphabet,
- le niveau des mots, où chaque mot du lexique forme une sous-unité indépendante (1179 mots de 4 lettres dans la première version du modèle).

Lors de la présentation d'un mot, toutes les sous-unités correspondant au stimulus vont s'activer simultanément. De la même façon que dans le modèle Logogène, les auteurs expliquent l'effet de fréquence par le fait que les mots plus fréquents ont un seuil d'activation plus bas. Ce modèle présente néanmoins la particularité d'être « connexionniste », c'est-à-dire qu'il considère que toutes les sous-unités sont reliées entre elles par des connexions bidirectionnelles activatrices ou inhibitrices (qui s'établissent après apprentissage), et c'est ce qui lui permet de rendre compte, en outre, de l'effet de supériorité du mot. Les connexions excitatrices s'établissent entre les sous-unités de niveaux inférieur ou supérieur correspondant au même stimulus, tandis que les connexions inhibitrices s'établissent entre les sous-unités d'un même niveau ou entre les sous-unités correspondant à un stimulus différent (cf. Figure 2.2). Par exemple, dans un mot comme « TAKE », la lettre « T » située en première position est activée par les sous-unités correspondantes, au niveau inférieur (traits visuels « | » et « — ») mais aussi par celles du niveau supérieur (i.e. tous les mots ayant un « T » en première position). L'activation de la sous-unité « T » va aussi entraîner l'inhibition des sous-unités qui lui sont incompatibles, c'est-à-dire tous les mots ne commençant pas par un « T » et toutes les

autres sous-unités lettres. Parallèlement, si le mot « TAKE » est activé il va, grâce à des connexions descendantes, activer les autres lettres qui le composent (même si celle-ci n'ont pas encore été reconnues). C'est la raison pour laquelle une lettre présentée dans un mot est plus facile à identifier que lorsqu'elle est présentée seule ou au sein d'une chaîne de caractères aléatoires. Des modèles dérivés du modèle à Activation Interactive ont été développés quelques années plus tard ([Jacobs & Grainger, 1992](#); [Grainger & Jacobs, 1996](#)). Ils reposent sur les mêmes règles d'activation mais permettent en plus de prédire de manière computationnelle les temps de réponse ou les pourcentages d'erreurs dans une tâche de décision lexicale.

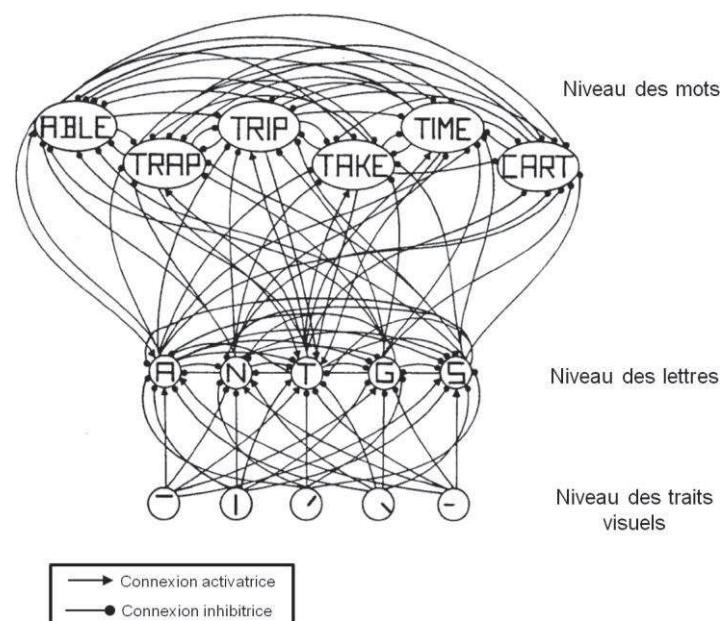


Figure 2.2 - Exemple du fonctionnement du modèle à Activation Interactive ([McClelland & Rumelhart, 1981](#)) L'activation s'effectue sur les trois niveaux (traits visuels, lettres et mots) de manière parallèle. La régulation de l'activité se fait grâce à un réseau de connexions activatrices et inhibitrices entre les sous-unités.

Le **modèle à Activation Vérification** ([Paap et al., 1982](#)) constitue, en quelques sortes, une combinaison entre les trois modèles présentés précédemment. En effet, dans ce modèle, la reconnaissance des mots s'effectue en deux étapes : une étape d'activation en parallèle des lettres et des mots à partir des traits visuels et une étape de vérification des mots candidats qui s'effectue de manière sérielle. Les représentations des lettres sont contenues dans une sous-unité appelée « alphabetum ». Elles sont activées indépendamment pour chaque position de lettre dans le mot et de manière plus ou moins importante en fonction de leur correspondance

avec les traits visuels. Par exemple si le mot présenté est « PORE », la lettre P va avoir le score d'activation (probabilité) le plus important pour la position 1, mais d'autres lettres ayant des traits visuels communs avec le « P », comme le « R » par exemple, vont aussi être activées en parallèle pour cette même position. Les représentations des mots, contenues dans le lexique mental, sont activées si la moyenne des scores des lettres les composant atteint un seuil suffisant. Durant la phase de vérification, les mots candidats qui ont été activés sont comparés de façon sérielle avec la représentation des traits visuels, et le mot ressemblant le plus au stimulus sera sélectionné. Ce modèle permet de rendre compte de l'effet de fréquence par le fait que la vérification s'effectue par ordre de fréquence décroissant : les mots les plus fréquents seront donc validés plus rapidement. Il rend aussi compte de l'effet de supériorité du mot, sans faire intervenir de mécanisme de rétroaction comme c'est le cas dans le modèle de McClelland et Rumelhart (1981). En effet, si l'information provenant de l'alphabetum est insuffisante, le lecteur va baser sa décision sur l'information lexicale : si une de ses lettres n'a pas été vue mais que le mot a été activé grâce aux autres lettres le constituant, le modèle est capable d'inférer l'information alphabétique manquante.

2-2- PERFORMANCES VISUELLES ET VISIBILITE DES LETTRES

Comme nous l'avons noté ci-dessus, les modèles de reconnaissance des mots issus de l'approche psycholinguistique ne valent que pour les mots courts présentés en vision fovéale. En effet, lors d'une fixation sur une ligne de texte, nous ne sommes capables d'identifier qu'un nombre limité de lettres, uniquement les lettres les plus proches de la fovéa. La visibilité des lettres est donc un facteur déterminant dans la lecture, autant pour les performances de reconnaissance de mots que pour le comportement oculomoteur. Après une présentation générale des performances visuelles, nous nous concentrerons sur les études concernant plus particulièrement la reconnaissance de lettres et introduirons les notions d'empan visuel et d'empan perceptif qui permettent de donner une mesure précise de la quantité de lettres visibles lors d'une fixation. La dernière partie de cette section présentera les études concernant l'influence des facteurs visuels sur la reconnaissance de mots.

2-2-1 – Performances visuelles en vision centrale et périphérique

Les signaux qui arrivent sur la rétine sont traités par les différentes structures du système visuel de sorte que, ce que nous voyons n'est pas une réplique exacte mais une image

filtrée et optimisée des stimuli lumineux (voir Chapitre 1). La façon dont nous percevons un stimulus dépend donc non seulement de ses caractéristiques physiques, telles que sa taille ou sa luminance, mais aussi de notre capacité à le détecter, de nos performances visuelles propres.

2-2-1-1 – L'acuité visuelle

L'acuité visuelle est la mesure optométrique la plus courante de la fonction visuelle. Elle est définie comme la capacité à discriminer une cible (un point, une ligne ou une lettre) de son fond, en un point donné du champ visuel et au contraste maximal. L'acuité morphoscopique consistant à identifier des lettres ou des dessins, est le type d'acuité visuelle le plus couramment évalué lors des examens cliniques. Snellen ([1862](#)) fut le premier à proposer une échelle de test contenant des lettres paramétrées appelées optotypes, permettant de mesurer l'acuité visuelle morphoscopique au centre du champ visuel. L'Acuité de Snellen est définie par la formule $V=d/D$, où d est la distance de lecture, fixée habituellement à 20 pieds (soit environ 6 mètres), et D la distance à laquelle la plus petite lettre identifiée par le patient sous-tend un angle de 5 minutes d'arc. Par exemple, un patient qui ne peut lire correctement que jusqu'à la cinquième ligne du tableau (cf. Figure 2.3a), où les optotypes sous-tendent 10 minutes d'arc à 20 pieds, soit 5 minutes d'arc à 40 pieds, a donc une acuité visuelle de 20/40. Inversement, les patients qui peuvent lire au-delà de la huitième ligne du tableau ont une acuité supérieure à 20/20.

L'acuité visuelle est maximale au niveau de la fovéa, puis diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne du centre de la rétine. Les valeurs mesurées peuvent varier en fonction des conditions expérimentales et du stimulus choisi ([Kerr, 1971](#)), mais, à titre indicatif, on peut retenir qu'à 5° d'excentricité l'acuité visuelle n'est plus qu'à 1/3 de sa valeur maximale (cf. Figure 2.3b). Il faut aussi noter que cette diminution n'est pas équivalente le long des quatre axes de la rétine ; l'acuité visuelle diminue plus rapidement le long de l'axe vertical que de l'axe horizontal, et plus rapidement le long de l'axe nasal que de l'axe temporal ([Wertheim, 1980](#)). Ces variations d'acuité s'expliquent par l'organisation plus ou moins convergente des voies visuelles ; en effet, plusieurs études ont mis en évidence une corrélation linéaire entre l'acuité visuelle en un point de la rétine et le facteur de magnification corticale dans la zone de V1 correspondante ([Covey & Rolls, 1974](#) ; [Duncan & Boynton, 2003](#)).

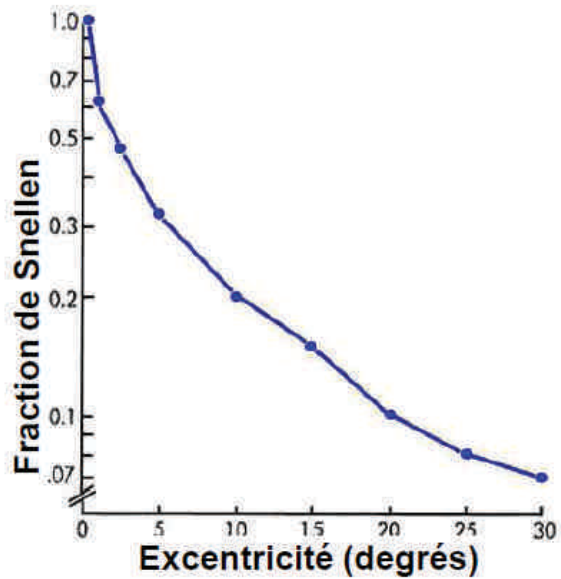
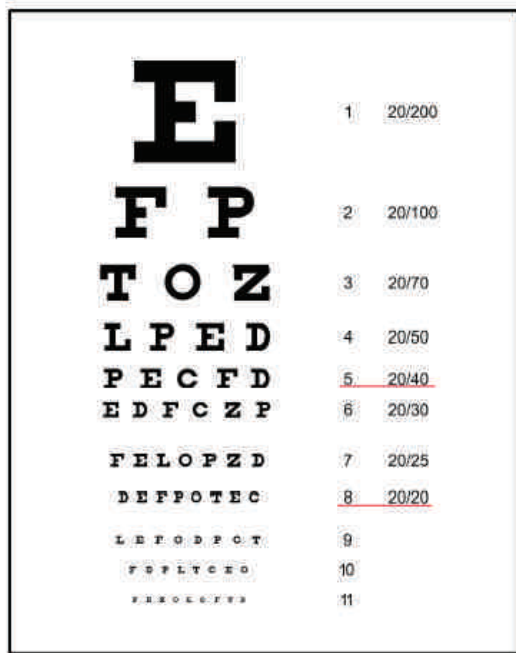


Figure 2.3 - Mesure de l'acuité visuelle

a – Echelle de mesure d'acuité visuelle de Snellen.

b – Mesure de l'acuité visuelle moyenne de Snellen en fonction de l'excentricité rétinienne. L'acuité visuelle est maximale au centre de la rétine et diminue rapidement lorsqu'on s'en éloigne : à 5° d'excentricité, elle n'est plus qu'à un tiers de sa valeur maximale. *Modifié depuis Moses & Hart (1987).*

2-2-1-2 – La sensibilité au contraste

Notre capacité à voir est aussi limitée par notre sensibilité au contraste, c'est-à-dire notre capacité à détecter une différence de luminance entre un stimulus et le fond sur lequel il est présenté. Elle se mesure généralement grâce à des images appelées réseaux de fréquences spatiale (ou « gratings »), composées d'une alternance de bandes claires et sombres. La capacité à distinguer les barres dépend de la différence entre leurs niveaux de luminance (contraste) mais aussi de la largeur des barres (fréquence spatiale) et de la luminance moyenne du grating ([Schade, 1956](#) ; [Campbell & Robson, 1968](#)). On appelle « seuil de contraste » la plus petite différence de luminance perceptible pour une fréquence spatiale et une luminance moyenne données ; et la sensibilité au contraste s'exprime comme l'inverse de ce seuil (Figure 2.4).

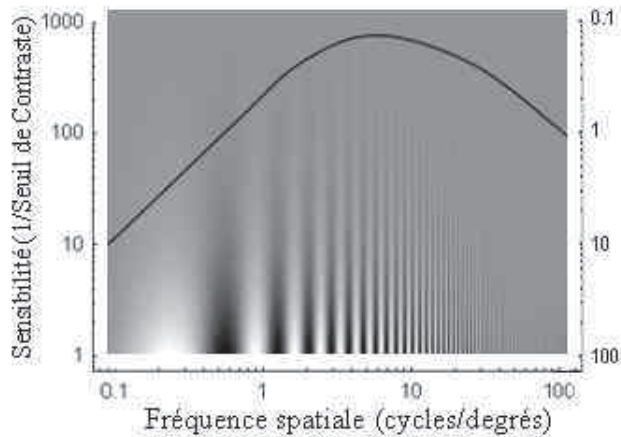


Figure 2.4 – Fonction de sensibilité au contraste en vision fovéale mesurée grâce à un « grating ».

La courbe donne la valeur du seuil de contraste en fonction de la fréquence spatiale. Le seuil de contraste est calculé grâce à la formule $(I_{max}-I_{min})/(I_{max}+I_{min})$, où I_{max} est l'intensité lumineuse de la barre claire et I_{min} celle de la barre foncée. La sensibilité au contraste, exprimée comme l'inverse du seuil, est maximale pour une fréquence spatiale comprise entre 5 et 10 cycles par degrés. Modifié depuis forum.davidson.edu

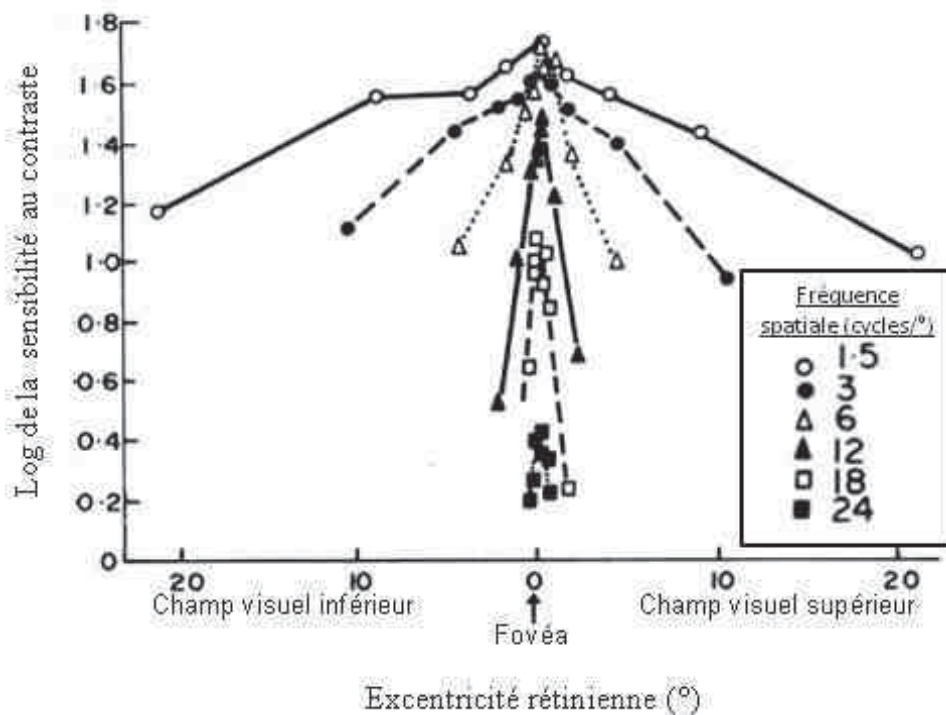


Figure 2.5 – Diminution de la sensibilité au contraste en fonction de l'excentricité rétinienne pour plusieurs fréquences spatiales. Lorsque l'excentricité rétinienne augmente, la sensibilité au contraste diminue plus rapidement pour les hautes que pour les basses fréquences spatiales. Modifié depuis <https://cognet.mit.edu/>.

La sensibilité au contraste diminue lorsque l'excentricité rétinienne augmente, et ce de façon plus importante pour les hautes que pour les basses fréquences spatiales (cf. Figure 2.5). Plusieurs études suggèrent que cette diminution serait plus due à la diminution de l'acuité visuelle qu'à une réelle perte de la sensibilité au contraste avec l'excentricité. En effet, Virsu & Rovamo (1979), ont montré, comme dans le cas de l'acuité visuelle, que les performances de détection de contraste étaient les mêmes lorsque l'excentricité rétinienne était contrebalancée par une augmentation de la taille des stimuli. La différence de pente qu'on observe entre les hautes et basses fréquences serait, elle, due à une différence de sélectivité des neurones entre le centre et la périphérie. En effet, pour détecter les contrastes, les neurones de la rétine et des voies visuelles fonctionnent par groupes, appelés «*spatial frequency channels*» ayant chacun une gamme de fréquence spatiale préférentielle (Wright & Johnston, 1983). La périphérie contiendrait moins de groupes de neurones sensibles aux hautes fréquences spatiales que le centre de la rétine, ce qui expliquerait pourquoi la sensibilité au contraste pour les hautes fréquences diminue plus rapidement que celle pour les basses fréquences spatiales.

2-2-1-3 – Le temps de traitement du signal

Le temps nécessaire pour qu'un stimulus soit détecté dépend de la complexité de ce stimulus et de la zone de la rétine stimulée. Les propriétés des voies parvo et magnocellulaire suggèrent un traitement plus rapide des signaux dans la partie périphérique de la rétine, mais ceci est vrai seulement pour les stimuli les plus simples tels qu'un point lumineux ou un patch de Gabor (Carrasco et al., 2003). En revanche, plusieurs études ont rapporté des résultats inverses, soit un traitement plus rapide en fovéa, des stimuli plus complexes tels que les lettres ou les mots (Babkoff et al., 1985; Strasburger et al., 1991; Legge et al., 2001). Il a été proposé par Cantone et al. (2008) que ce temps de traitement supplémentaire serait lié à la difficulté à combiner les éléments de base de l'objet. Ainsi, plus le nombre de traits visuels composant l'objet est important, plus le temps de traitement en périphérie est long.

2-2-1-4 – Le phénomène d'encombrement ou « crowding »

Le phénomène d'encombrement, ou « crowding » en anglais, se définit comme la difficulté à identifier une cible lorsque celle-ci est entourée, flanquée, d'autres objets. Ce phénomène, absent ou presque en fovéa, augmente de façon proportionnelle à l'excentricité

de la cible ([Bouma, 1970, 1973](#)). Un exemple de crowding est présenté à la Figure 2.6 : si on fixe la croix centrale, le « r » est plus difficile à identifier à droite ou en bas, où il est entouré d'autres lettres ou de dessins, qu'à gauche où il est présenté de manière isolée. Ce phénomène a été mis en évidence pour de nombreuses tâches de discrimination telles que l'acuité de Vernier ([Levi et al., 1985](#)), la reconnaissance de lettres ([Bouma, 1970](#)), de mots ([Chung, 2004](#)) ou de visages ([Martelli et al., 2005](#), pour une revue voir [Levi, 2008](#)).

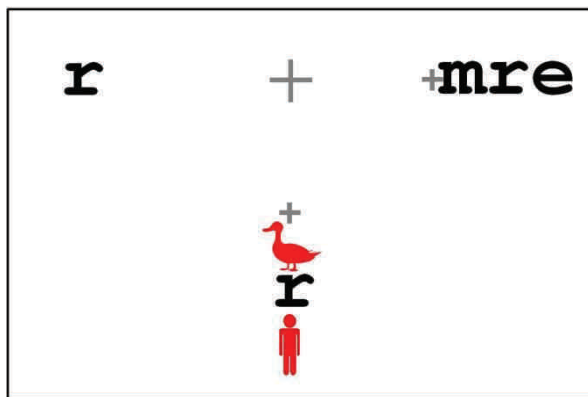


Figure 2.6 – Exemple d'encombrement.

- Lorsqu'on fixe la croix centrale, le « r » présenté à gauche est plus facilement identifié que le « r » présenté à droite ou en bas, car il n'est pas entouré d'autres caractères pouvant gêner sa reconnaissance.
- Diminuer l'excentricité de la cible permet de diminuer l'effet de l'encombrement: le « r » de droite est plus facilement reconnu lorsqu'on fixe la petite croix grise.
- L'encombrement dépend de la similarité entre la cible et les distracteurs : le « r » flanqué de lettres noires est plus difficile à identifier que celui flanqué de dessins rouges. *Modifié depuis Pelli & al. (2007).*

Pour quantifier l'effet de l'encombrement, on mesure généralement la taille de l'espace critique, c'est-à-dire la plus petite zone d'espacement nécessaire autour de la cible pour que sa reconnaissance ne soit pas gênée par les distracteurs. En périphérie du champ visuel, l'espace critique a été mesuré comme étant une ellipse centrée sur la cible, dont la taille est proportionnelle à l'excentricité (rayon moyen égal à 0,5 fois l'excentricité de la cible) et dont le grand axe est orienté vers le point de fixation ([Bouma, 1970](#); [Toet & Levi, 1992](#) et cf. Figure 2.7). La taille de l'espace critique en vision périphérique ne dépend pas de la taille de la cible ou de celle des distracteurs ; par conséquent, augmenter la taille des stimuli ne réduit pas l'effet de l'encombrement ([Pelli et al., 2004](#)). En fovéa en revanche, il a été montré que l'encombrement était très réduit (4-5 min d'arc, [Flom et al., 1963](#); [Toet & Levi, 1992](#)), et que pour certains stimuli, il était proportionnel à la taille de la cible ([Levi et al., 2002](#)). Enfin, l'effet de l'encombrement dépend aussi de la similarité entre les stimuli ; plus la cible ressemble aux distracteurs en termes de forme, de taille ([Nazir, 1992](#); [Kooi et al., 1994](#)) ou de couleur ([Bouma, 1969](#); [Kooi et al., 1994](#)), plus l'effet de l'encombrement est important (cf. Figure 2.6).

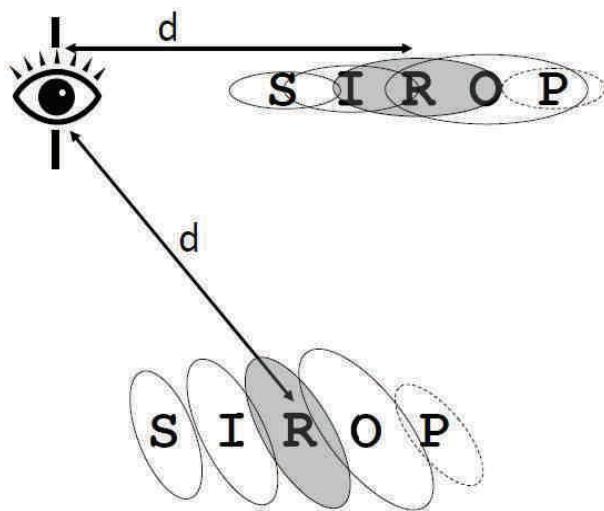


Figure 2.7 – Représentation des zones d'espace critique.

- L'espace critique est une ellipse dont la taille augmente avec l'excentricité et dont le grand axe est orienté vers le point de fixation.
- Lorsque le mot est sur le même axe horizontal que le point de fixation, le « R » central est « encombré » par les lettres voisines qui tombent dans sa zone d'espace critique. Ceci n'est pas le cas lorsque le mot est présenté en-dessous du point de fixation.
- La taille de l'espace critique dépend aussi de la position de la lettre dans la chaîne de caractères. Les lettres extrêmes, et plus particulièrement la lettre située en fin de chaîne (P), sont moins soumises à l'encombrement que les lettres internes du mot.

Il est important de distinguer le phénomène d'encombrement de deux autres types de masquage spatial : le masquage latéral (« *pattern masking* ») et la suppression de contour (« *surround suppression* »). Tout d'abord, l'encombrement se distingue par le niveau de traitement auquel il intervient : le masquage latéral (Pelli et al., 2004) et la suppression de contour (Petrov et al., 2007) interviendraient au niveau de la détection des traits visuels, ils gêneraient donc la détection et seulement indirectement, l'identification des stimuli. L'encombrement, en revanche, interviendrait à un niveau supérieur, lors de l'intégration des traits visuels. Il gênerait donc uniquement l'identification des stimuli complexes (lettres, visages) et pas leur détection (Parkes et al., 2001; Pelli et al., 2004; Nandy & Tjan, 2007). De plus, la caractéristique principale permettant de différencier encombrement et masquage latéral est que, contrairement à l'encombrement, l'effet du masquage latéral dépend de la taille des stimuli et est indépendant de l'excentricité de la cible (Pelli et al., 2004).

2-2-2 – La visibilité des lettres

Pour étudier l'influence des facteurs visuels sur la reconnaissance de lettres, on utilise, la plupart du temps, un paradigme d'identification perceptive. Celui-ci consiste à mesurer les performances d'identification (pourcentage de réponses correctes ou temps de dénomination) des participants, lorsqu'on leur présente des stimuli (e.g. des symboles, des lettres ou des mots) à des distances variables par rapport à un point de fixation et pour une durée limitée.

Un temps de présentation limité, généralement entre 40 et 200 ms, permet d'éviter les effets de plafond (100% de bonnes réponses) et de s'assurer que le sujet ne fasse pas de saccade vers la cible. L'étude des performances de reconnaissance de lettres isolées permet d'évaluer l'effet de la diminution de l'acuité visuelle indépendamment de l'effet de l'encombrement ([Nazir et al., 1992](#)), mais dans la plupart des études, les lettres cibles sont présentées entourées de deux autres caractères appelés « flankers » ([Legge et al., 2001](#)) ou au sein d'une chaîne de caractères de longueur variable ([O'Regan et al., 1983](#)). L'utilisation d'une chaîne de caractères plutôt que d'un mot permet d'étudier les effets des facteurs visuels sur les performances de reconnaissance de lettres flanquées, indépendamment des facteurs lexicaux et cognitifs. Nazir et al. ([1992](#)) ont mesuré les pourcentages d'identification correcte de lettres selon différentes conditions d'excentricité horizontale et d'espacement entre les caractères. Leur résultats montrent que la probabilité d'identification des lettres diminue de manière exponentielle lorsque l'excentricité augmente de 0° à 5° et que cette diminution est d'autant plus rapide que les caractères sont proches les uns des autres. Ils ont aussi mis en évidence le fait qu'une lettre isolée est mieux reconnue qu'une lettre présentée dans une chaîne de caractères ([Bouma, 1973](#)) et qu'une lettre située en bout de chaîne, à la première ou à la dernière position, est mieux reconnue qu'une lettre placée au sein de la chaîne ([Bouma, 1970](#); [Townsend et al., 1971](#); [Nazir et al., 1991](#)). D'autres études ont aussi montré que plus les "flankers" sont similaires à la cible (symboles, chiffre, lettres), plus la diminution des performances est importante ([Bernard & Chung, 2011](#)).

Legge et al. ([2001](#)) ont effectué des mesures du pourcentage de reconnaissance de lettres présentées dans des triplets en fonction de plusieurs paramètres de présentation : l'excentricité horizontale, le côté de présentation, la position de la lettre dans le triplet, l'excentricité verticale, le temps de présentation et la présence ou non d'un masque après l'affichage des lettres. Leurs données montrent tout d'abord que les performances de reconnaissance sont maximales lorsque la lettre est présentée au niveau du point de fixation, dans la zone correspondant à la fovéa, puis diminuent de manière exponentielle lorsque **l'excentricité horizontale** augmente. Ce premier résultat, que l'on retrouve dans toutes les études sur la reconnaissance de lettres ([Bouma, 1970](#); [Nazir et al., 1992](#)) s'explique par les propriétés de l'encombrement et de l'acuité qui limitent la visibilité des lettres lorsque celles-ci sont éloignées du point de fixation. La proportion de réponses correctes en fonction de l'excentricité horizontale exprimée en nombre de lettres, peut être estimée par une gaussienne, dont le maximum est centré sur 0 et dont l'écart type varie en fonction des paramètres de

présentation (cf. Figure 2.8). Une variation de l'amplitude de la courbe témoigne d'un effet constant d'un paramètre donné sur les performances de reconnaissance, quelle que soit l'excentricité horizontale (c'est le cas par exemple pour l'effet du masque), tandis qu'une variation de l'écart type témoigne d'une interaction entre l'excentricité horizontale et le facteur choisi (l'excentricité verticale ou le temps de présentation par exemple), c'est-à-dire que l'effet de ce facteur sur les performances sera plus ou moins important en fonction de l'excentricité horizontale.

Les résultats de Legge et al. (2001) montrent aussi une **asymétrie** dans les performances d'identification : l'écart type des courbes estimées est légèrement plus important pour les lettres présentées à droite que pour celles présentées à gauche du point de fixation (cf. Figure 2.8a). Cet effet de supériorité du champ visuel droit (ou *Right Visual Field (RVF) advantage*) se retrouve dans certaines études concernant la reconnaissance de lettres présentées dans des chaînes de caractères (Bryden, 1970; Nazir et al., 1991), mais pas dans toutes. Par exemple, Stevens & Grainger (2003) ont comparé les performances d'identification de lettres pour les hémichamps droit et gauche mais avec des conditions de présentation se rapprochant plus des conditions de la lecture de mots (i.e. plusieurs positions de fixation possibles contre seulement deux chez Nazir et al (1991) et des chaînes de cinq ou sept caractères contre seulement trois chez Legge et al. (2001)) et n'ont obtenu aucune différence significative entre les deux côtés de présentation, excepté pour les lettres situées en bout de chaîne. Cette asymétrie droite/gauche est présente de façon plus robuste dans la reconnaissance de mots (voir O'Regan, 1981, Brysbaert et al., 1996 et cf. section 2-2-3) mais en revanche, elle ne se retrouve ni dans la reconnaissance de lettres isolées (Bouma & Legein, 1977, ou effet très faible, Bryden, 1986), ni dans la reconnaissance de symboles (Grainger et al., 2010). Cette asymétrie, qui semble être spécifique aux processus liés à la lecture de mots ou de chaînes de lettres, peut s'expliquer en termes d'habitudes de lecture ou de spécialisation hémisphérique.

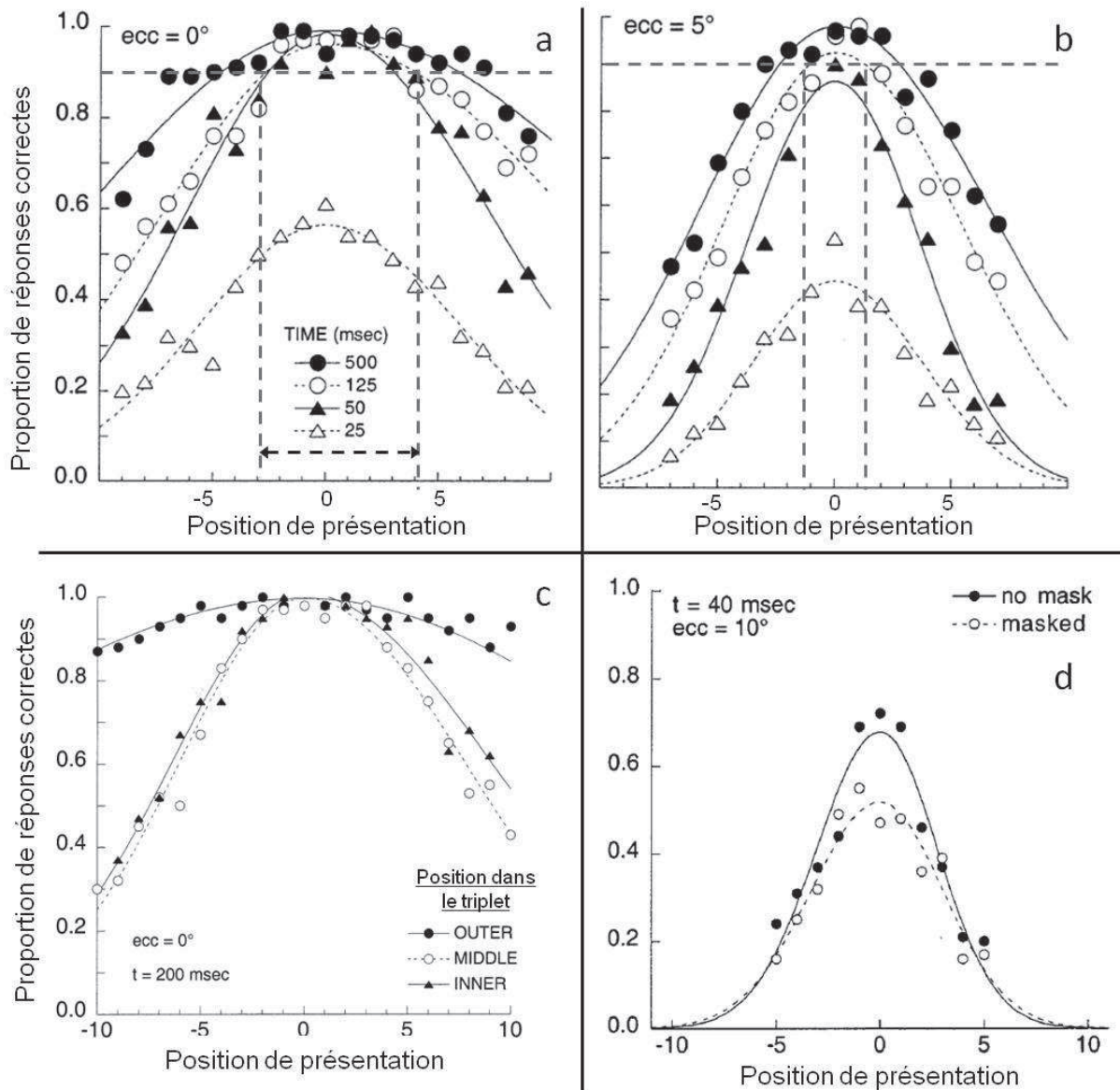


Figure 2.8 – Performances de reconnaissance de lettres en fonction de la position horizontale de présentation obtenues par Legge et al. (2001). La position de présentation de la lettre cible est exprimée en nombre de lettres par rapport au point de fixation ; les valeurs positives correspondent aux cas où la lettre est présentée à droite du point de fixation.

a – Performances obtenues dans la condition où le triplet est aligné verticalement avec le point de fixation (excentricité = 0°) pour quatre temps de présentation. La flèche en pointillés représente la taille de l’empan visuel (environ sept lettres) en vision centrale pour un critère de précision de 90% de réponses correctes et un temps de présentation de 125 ms (voir Section 2-2-3).

b – Performances obtenues dans la condition où le triplet est présenté 5° en dessous du point de fixation. A cette excentricité verticale, la taille de l’empan à 90% et pour une durée de présentation de 125ms n’est plus que de deux lettres.

c – Comparaison des performances pour les trois positions possibles de la lettre dans le triplet (OUTER=Externe, MIDDLE=Centrale, INNER=Interne) pour un temps de présentation de 200ms.

d – Comparaison des performances pour une condition non masquée (points noirs) et une condition masquée (points blancs) pour un temps de présentation de 40ms et une excentricité verticale de 10°.

Une hypothèse possible serait que les personnes lisant habituellement de gauche à droite ont plus l'habitude de lire les mots situés après le mot qu'ils sont en train de fixer, à droite du point de fixation, ce qui expliquerait leurs meilleures performances dans cette partie du champ visuel ([Nazir, 2000](#); [Nazir et al., 2004](#)). Mais le sens de lecture ne semble pas être le seul facteur en cause, car si cet effet est diminué, il n'en est pas pour autant inversé chez les personnes lisant de droite à gauche ; les courbes de reconnaissance de lettres en hébreu sont plus symétriques qu'en français mais ne montrent pas un avantage pour le champ visuel gauche ([Nazir et al., 2004](#)). Une hypothèse complémentaire, proposée par Brysbaert ([1994](#)), serait que l'asymétrie droite/gauche serait aussi due au fait que la partie droite du champ visuel se projette préférentiellement sur l'hémisphère cérébral gauche qui est, chez la plupart des personnes, dominant dans les processus liés au langage ([Karim & Kojima, 2010](#)). Cette spécialisation hémisphérique favoriserait la reconnaissance des lettres dans le champ visuel droit et ce, quel que soit le sens de lecture. Ces deux facteurs agiraient donc dans le même sens pour les personnes lisant de gauche à droite mais de manière opposée pour les personnes lisant de droite à gauche expliquant ainsi l'absence d'asymétrie dans les performances de reconnaissance de lettres en hébreu.

Comme nous l'avons dit précédemment, plusieurs études ont montré qu'une lettre située en fin de chaîne est plus facile à identifier qu'une lettre présentée au sein de la chaîne car elle est moins soumise à l'encombrement ([Townsend et al., 1971](#); [Nazir et al., 1991](#); [Nazir et al., 1992](#)). Cet effet de l'importance de la **position de la lettre dans la chaîne** a été précisé par Legge et al. ([2001](#), cf. Figure 2.3c) qui ont observé, en plus de la différence entre la lettre « centrale » et les lettres extrêmes, une différence entre la lettre extrême située à la position la plus proche du point de fixation (ou lettre « interne ») et la lettre extrême la plus éloignée du point de fixation (lettre « externe ») (voir aussi [Bouma, 1970](#)). Les résultats de Legge et al, comme ceux de Bouma ([1970](#)), montrent qu'il n'y a qu'une légère différence de performances entre la lettre extrême interne et la lettre centrale, mais qu'en revanche, et de façon surprenante, les performances sont beaucoup plus élevées pour la lettre extrême externe, qui est pourtant la plus éloignée du point de fixation (mais voir [Grainger et al., 2010](#))

Legge et al. ([2001](#)) ont aussi mesuré l'effet de **l'excentricité verticale** sur les performances de reconnaissance de lettres. En plus de la condition classique (excentricité verticale = 0°, points noirs sur la Figure 2.8b), ils ont testé trois autres conditions où les triplets de lettres étaient présentés en-dessous de la ligne du regard (à 5°, 10° ou 20° du point de fixation). Pour chaque condition d'excentricité verticale, la taille des caractères était

augmentée de manière à rester au-dessus du seuil de visibilité. Lorsque l'excentricité augmente, l'amplitude et l'écart type des courbes diminuent, ce qui signifie que les performances de reconnaissance sont moins élevées dans le champ visuel inférieur, même lorsque la diminution de l'acuité visuelle est compensée par l'augmentation de la taille des caractères. Cela suggère aussi que l'effet de l'excentricité horizontale sur la reconnaissance des lettres est plus important lorsque celles-ci sont présentées en-dessous du point de fixation. Mais notons que cet effet ne devrait être présent que lorsque la taille des caractères est compensée. Les propriétés de l'acuité visuelle et de l'encombrement portent à croire que dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque la taille des lettres est constante, l'effet du décalage horizontal devrait être moins important dans le champ visuel inférieur. Nous discuterons cette question plus en détails dans les Chapitre 5 et 6.

Le temps de présentation est aussi un facteur limitant la reconnaissance de lettres. En effet, Legge et al. (2001) ont testé huit différents temps de présentation (de 25 à 500 ms) et leurs résultats montrent, de manière générale, une diminution des performances de reconnaissance (i.e. une diminution de l'amplitude et de l'écart type des courbes estimées) lorsque le temps de présentation diminue. Les auteurs ont noté que, lorsque le temps de présentation augmente, l'écart type des courbes augmente moins rapidement que leur amplitude suggérant que les lettres situées en périphérie (à l'exception des lettres extrêmes) ne sont identifiables qu'à partir du moment où les lettres centrales sont elles-mêmes reconnaissables et que le temps de présentation est suffisamment long (plus de 100ms).

Enfin, en comparant les performances entre une condition d'affichage normale et une condition « **masquée** » où la présentation du triplet est suivie de l'affichage d'une série de dièses, Legge et al. ont montré, que l'effet inhibiteur caractéristique du masquage temporel (Schiller, 1965) était surtout présent pour les temps de présentation courts (<80 ms). La présence d'un masque entraînait une diminution de l'amplitude des courbes mais pas, ou très peu, de leur écart type suggérant que le masquage temporel n'interagit pas avec la position horizontale de présentation (cf. Figure 2.8d).

L'ensemble de ces résultats confirme le rôle important que jouent les facteurs visuels, en particulier l'acuité visuelle et l'encombrement, dans la reconnaissance de lettres.

2-2-3 – Empan visuel et empan perceptif

Pour évaluer la quantité d'information qui peut être extraite durant une fixation, on mesure généralement la taille de l'empan visuel ou de l'empan perceptif. L'empan visuel repose exclusivement sur les aspects visuels de la reconnaissance de lettres tandis que l'empan perceptif se mesure dans des conditions de lecture plus naturelles et dépend donc aussi de facteurs cognitifs.

L'empan visuel été défini par O'Regan (1990) comme l'espace, de part et d'autre du point de fixation, au sein duquel il est possible d'identifier correctement une lettre sans faire de saccade et sans l'aide du contexte ou de connaissances linguistiques particulières. La taille de l'empan visuel correspond à la distance horizontale seuil, exprimée en nombre de caractères, au-delà de laquelle le sujet ne peut plus identifier correctement une lettre cible présentée dans une chaîne de caractères ; elle est va donc varier de façon importante en fonction de certains des paramètres cités précédemment comme le temps de présentation ou l'excentricité verticale. Lorsque l'on donne une mesure de la taille de l'empan, il est aussi nécessaire de préciser le pourcentage d'identification correcte que l'on s'est fixé comme seuil ; plus ce seuil sera élevé plus la taille de l'empan sera réduite. O'Regan et al. (1983), par exemple, ont mesuré un empan visuel d'environ 22 lettres pour un seuil d'identification de 50% et de 11 lettres pour un seuil de 90% pour des lettres de $0,2^\circ$ présentées durant 150 ms et flanquées par deux chiffres. Les courbes de Legge et al. (2001) présentées à la Figure 2.8, permettent aussi de connaître de la taille de l'empan visuel. Sur ces courbes, la taille de l'empan, pour une condition d'excentricité verticale et de temps de présentation donnée, est donnée par la largeur de la courbe à la hauteur correspondant au critère de précision fixé. Par exemple, pour une excentricité verticale de 0° , un temps de présentation de 125 ms et un critère de précision de 90%, la taille de l'empan visuel mesuré par Legge et al. est d'environ sept lettres pour une taille de caractères de $0,5^\circ$ (cf. Figure 2.8a, flèche horizontale en pointillés). La particularité de l'étude de Legge et al. est qu'en plus d'estimer la taille de l'empan visuel en vision centrale, elle permet aussi d'estimer la taille de l'empan visuel en vision périphérique, lorsque la chaîne de caractères est décalée verticalement par rapport au point de fixation. La Figure 2.3b montre que pour un temps de présentation et un critère de précision équivalents (i.e. 125ms et 90%), mais pour une taille de lettres de 2° , la taille de l'empan visuel à 5° d'excentricité verticale n'est plus que de deux lettres environ. Comme

nous l'avons expliqué précédemment, cette réduction de l'empan visuel en vision périphérique ne s'applique vraisemblablement que lorsque la taille des caractères est magnifiée en périphérie.

Une question importante et qui nous intéressera tout particulièrement par la suite est celle de l'influence de la taille des caractères (ou de manière équivalente, celle de la distance de présentation) sur la taille de l'empan visuel. En effet, il a été suggéré que les effets de l'acuité visuelle et de l'encombrement variaient de manière constante et linéaire en fonction de l'excentricité ([Wilson et al., 1990](#)) et que, par conséquent, une lettre présentée à une certaine excentricité (exprimée en degrés) devrait avoir la même probabilité d'identification qu'une lettre deux fois plus grande mais présentée deux fois plus loin. Selon cette loi de proportionnalité, la taille de l'empan visuel, mesurée en nombre de lettres, devrait être constante quelles que soient la taille des caractères et la distance de présentation. Partant de ce postulat, la plupart des auteurs considèrent que, dans une certaine gamme de taille de caractères, et à partir du moment où l'on se situe au-dessus du seuil d'acuité visuelle, l'empan visuel est indépendant de la taille angulaire des caractères et de la distance de présentation ([Rubin & Legge, 1989](#); [Legge et al., 2001](#); [Crossland et al., 2005b](#)). Cependant certaines études ont rapporté un effet, léger mais non négligeable, de la distance de présentation et de la taille des caractères sur la taille de l'empan, même lorsque celle-ci est exprimée en nombres de caractères ([O'Regan et al., 1983](#); [Legge et al., 2007](#)). O'Regan et al. ([1983](#)), par exemple, ont montré que la taille de l'empan visuel était maximale pour une distance de présentation de 60 cm, équivalant à une taille de caractères de $0,2^\circ$ (22 lettres à 50%), et qu'elle diminuait pour des distances de présentation plus courtes (20 lettres à une distance de 30cm, soit une taille de caractères de $0,4^\circ$) ou plus importantes (environ 15 lettres pour une distance de 120 cm, soit une taille de caractères de $0,1^\circ$). Legge et al. ([2007](#)) ont mesuré la taille de l'empan visuel pour plusieurs tailles de caractères allant de $0,06^\circ$ à 4° et ont montré que la taille de l'empan visuel augmentait entre $0,06^\circ$ et $0,2^\circ$, et diminuait à partir de 1° . Il est donc important de garder à l'esprit qu'une variation de la taille angulaire des caractères, même réduite, peut avoir une influence sur la visibilité des lettres et sur les mouvements oculaires.

L'empan perceptif se définit comme l'espace autour du point de fixation au sein duquel l'information visuelle utile peut être extraite et se mesure généralement lors de la lecture naturelle de texte ([McConkie & Rayner, 1975](#); [O'Regan, 1979](#)). Le terme d'information utile comprend les lettres que l'on peut identifier, c'est-à-dire celles situées

dans l'empan visuel, mais aussi les lettres situées plus en périphérie, que l'on n'identifie pas correctement mais à partir desquelles on peut distinguer des indices qui nous renseignent sur la structure générale du texte (ponctuation, longueur du mot, espaces inter-mots). Selon cette définition, l'empan perceptif dépend donc aussi des effets lexicaux, sémantiques et syntaxiques, tels que l'effet de supériorité du mot (sur l'identification des lettres) ou l'effet de contexte sur la reconnaissance des mots. Contrairement à l'empan visuel qui ne dépend que de la visibilité des lettres, l'empan perceptif va donc aussi être influencé par des facteurs cognitifs tels que l'attention ou les habitudes de lecture. La méthode la plus courante permettant d'étudier les limites horizontales de l'empan perceptif est le paradigme de la **fenêtre mobile** (ou « *moving window* », cf. Figure 2.9). Cette technique consiste à masquer ou à modifier (McConkie & Rayner, 1975; voir aussi Rayner & Bertera, 1979; pour une revue voir Rayner, 1998) les lettres situées en périphérie, au-delà d'une certaine limite à gauche et à droite du point de fixation, pendant qu'un sujet lit un texte affiché sur un écran. Pour lire, le sujet ne peut donc utiliser que l'information préservée située à l'intérieur de la fenêtre, au centre de son champ visuel. L'enregistrement simultané des mouvements oculaires permet de « déplacer » la fenêtre en fonction de la position de fixation du sujet : dès lors que le sujet effectue une saccade et fixe une nouvelle position sur la ligne de texte, l'information précédemment fixée est masquée et les lettres dans la fenêtre autour du nouveau point fixé sont affichées normalement, alors que les lettres plus périphériques sont masquées. La taille de l'empan perceptif correspond à l'étendue maximale de la fenêtre à partir de laquelle la vitesse de lecture et/ou les caractéristiques des mouvements oculaires (i. e. l'amplitude des saccades et les durées de fixation) ne sont plus modifiées par rapport à une condition contrôle, sans fenêtre. En effet, si la vitesse de lecture est réduite ou les caractéristiques des saccades/fixations sont modifiées, cela signifie qu'une partie de l'information visuelle utile est masquée et donc que la fenêtre est plus petite que l'empan perceptif.

Condition contrôle

Je pense que, comme toujours, vous avez raison mon cousin.

Condition avec fenêtre mobile

fixation 1 Je pense que, xxxxx xxxxxxxxxxx, xxxx xxxx xxxxxxx xxx xxxxxxx.
fixation 2 xx xxxxx que, comme touxxxxx, xxxx xxxx xxxxxxx xxx xxxxxxx.

• = Position de fixation (non affichée durant l'expérience)
— = Saccade

Figure 2.9 – Paradigme de la fenêtre mobile.

Exemple de phrase affichée à l'écran; lorsque le sujet effectue une saccade du mot « pense » vers le mot « comme ». Ici la modification du texte, qui commence au-delà de sept espaces caractères à gauche et à droite du point de fixation, consiste à remplacer les lettres par des « x », sans masquer les espaces inter-mot.

Les expériences utilisant ce paradigme ont mis en évidence que l'empan perceptif s'étendait en moyenne jusqu'à 12-15 lettres à droite ([McConkie & Rayner, 1975](#); [Rayner & Bertera, 1979](#)) et 4 lettres à gauche ([McConkie & Rayner, 1976](#)) du point de fixation ; lorsque la fenêtre était plus petite que cette taille critique, l'amplitude des saccades était réduite et la durée des fixations augmentée. Néanmoins, la fenêtre ne s'étendait que jusqu'à 6-10 lettres à droite du point fixé lorsque les espaces entre les mots n'étaient pas préservés, suggérant donc que l'information sur la longueur des mots peut être extraite plus loin en périphérie que l'identité des lettres. Dans une expérience complémentaire, Rayner et al. ([1980](#)) ont montré qu'à gauche du point de fixation, seule l'information appartenant au mot fixé était utilisée ; la taille de la partie gauche de l'empan perceptif varie donc de 0 à 4 lettres en fonction de la position du regard par rapport à la première lettre du mot fixé. L'asymétrie de l'empan perceptif est donc bien plus marquée que celle de l'empan visuel (une lettre de différence seulement selon [Legge et al., 2001](#)), ce qui suggère qu'elle dépend surtout de facteurs attentionnel ou des habitudes de lecture. Lorsque nous lisons de gauche à droite, notre attention se porte surtout à droite du point de fixation car c'est dans cette partie du champ visuel que se situe l'information utile pour la suite de la lecture. Cette hypothèse est confirmée par l'expérience de Pollatsek, Bolozky, Well, & Rayner ([1981](#)) qui ont montré que l'asymétrie était inversée lorsque des participants lisaient de droite à gauche (i. e. en hébreu).

Une remarque importante concernant l'empan perceptif est cependant à noter. Les expériences utilisant le paradigme de la fenêtre mobile reposent sur le principe que les mouvements oculaires sont guidés exclusivement par le traitement en temps réel des mots, dans les limites de l'empan perceptif. Mais, comme nous le détaillerons dans la section [2-3](#)). Les mouvements oculaires dépendent aussi d'autres facteurs, visuels et oculomoteurs, et par conséquent, il n'est pas sûr qu'une modification de l'amplitude des saccades avec la taille de la fenêtre, soit le reflet direct d'une modification de la taille de l'empan perceptif (cf. [O'Regan, 1990](#)).

2-3 – IMPORTANCE DE LA POSITION DE REGARD DANS UN MOT : LE PHENOMENE OVP

Les données sur la visibilité des lettres ainsi que les caractéristiques des empans visuel et perceptif suggèrent que la position du regard joue un rôle important dans la reconnaissance des mots. Cette idée est confirmée par plusieurs effets robustes comme notamment le phénomène de position optimale du regard, qui montrent que les performances de reconnaissance ainsi que le comportement oculomoteur intra-mot dépendent fortement de la position de fixation au sein de ce mot. Dans cette section nous nous concentrerons sur l'influence de la position du regard lors de la reconnaissance de mots isolés, les effets observés sur les mouvements oculaires seront présentés dans la quatrième section de ce chapitre.

2-3-1 – Caractéristiques du phénomène OVP

En partant de l'observation selon laquelle, lors de la lecture de texte, le regard avait plus tendance à se positionner près du centre des mots ([Rayner, 1979](#); cf. section [2-3](#)), les chercheurs ont tenté de savoir si, de manière réciproque, la position du regard au sein des mots pouvait influencer les performances de lecture ([O'Regan, 1981](#); [O'Regan et al., 1984](#); [Nazir et al., 1991](#); [O'Regan & Jacobs, 1992](#)). Pour cela ils ont utilisé un paradigme simple consistant à présenter aux participants des mots isolés à des positions horizontales variables par rapport à une barre de fixation initiale (cf. Figure 2.10a). Par convention, la position de fixation initiale est exprimée en nombre de lettres par rapport au centre du mot ; une valeur négative signifie que le sujet fixe à gauche du centre du mot et que, par conséquent, le mot est

affiché en majeure partie dans la partie droite du champ visuel. La variable mesurée peut être soit la latence de dénomination du mot ([O'Regan et al., 1984](#)), soit le temps de réponse dans une tâche de décision lexicale, soit la probabilité de réponses correctes pour des mots présentés pour une durée brève (entre 30 et 150 ms en moyenne pour éviter les effets de plancher ou de plafond), dans une tâche d'identification perceptive ([Brybaert et al., 1996](#)) ou de décision lexicale ([Nazir et al., 1991](#)).

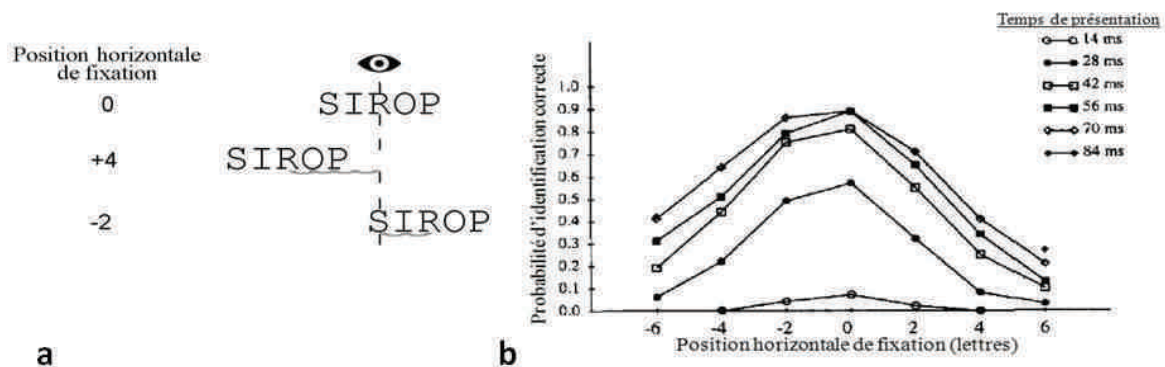


Figure 2.10 – Le phénomène OVP

a – Paradigme OVP : les mots sont présentés successivement à des positions horizontales variables par rapport à une barre de fixation centrale. La position de fixation est exprimée en nombre de lettres par rapport au centre du mot.

b – Courbes OVP classiques : la probabilité d'identifier un mot diminue lorsque la position de fixation s'éloigne du centre du mot. Modifier le temps de présentation influence surtout la hauteur des courbes mais très peu leur allure générale. Tiré de Brybaert et al. ([1996](#)).

Quelle que soit la variable mesurée, les courbes représentant la performance en fonction de la position horizontale de fixation présentent, de manière robuste et caractéristique, une forme en U (inversé ou non selon la variable dépendante), avec un maximum/minimum au centre ou légèrement à gauche du centre du mot et une pente un peu plus importante à droite qu'à gauche de l'optimum, au moins pour les langues lues de la gauche vers la droite. Ce phénomène, connu sous le nom de phénomène de position optimale du regard, ou OVP pour « *Optimal Viewing Position* » en anglais, montre donc que les performances de reconnaissance d'un mot sont meilleures lorsque le regard fixe la partie centrale d'un mot puis diminuent rapidement lorsqu'on s'éloigne de cette position optimale. Il a d'abord été mis en évidence dans une tâche de dénomination de mots en anglais ([O'Regan et al., 1984](#)), et a largement été étudié depuis, se retrouvant quels que soient la tâche, la langue,

le niveau de lecture, la fréquence lexicale et la longueur des mots (pour une revue voir [Brysbaert & Nazir, 2005](#)). Il s'observe aussi pour les mouvements oculaires (cf. section [2-4-2-1](#)). Il a été montré qu'une augmentation de la longueur des mots ou une diminution de leur fréquence lexicale entraînait une diminution du niveau général des performances sans modifier l'allure générale du phénomène OVP ([McConkie et al., 1989](#); [Nazir et al., 1998](#)). Brysbaert et al. ([1996](#)) ont étudié les variations du phénomène OVP en fonction de la durée de présentation et ont montré, qu'entre 28 et 84ms, les courbes conservaient la même allure générale avec toutefois une légère augmentation de la pente avec le temps de présentation. Dans la même expérience, Brysbaert et al. ont aussi montré que l'effet OVP n'était pas seulement présent lorsque le regard fixait l'une des lettres du mot, mais s'étendait en vision dite parafovéale, jusqu'à plus de quatre espaces caractères au-delà des limites du mot (cf. Figure 2.10b).

L'asymétrie droite/gauche du phénomène OVP dans les langues lues de la gauche vers la droite, à savoir le décalage de l'optimum des courbes légèrement à gauche du centre des mots et la plus rapide diminution des performances pour des positions de fixation se rapprochant de la fin des mots (partie droite des courbes), semble, comme pour la visibilité des lettres, résulter au moins en partie des habitudes de lecture ([Farid & Grainger, 1996](#); [Nazir et al., 2004](#)) et de la spécificité hémisphérique ([Brysbaert & d'Ydewalle, 1988](#); [Brysbaert, 1994](#)). Néanmoins, la répartition de l'information lexicale dans les mots influence aussi les performances de reconnaissance ([O'Regan & Jacobs, 1992](#)). En effet, il est souvent plus facile de reconnaître un mot à partir de ses premières lettres que de ses dernières, et cela parce que dans les langues écrites de gauche à droite, la partie gauche du mot est généralement plus informative que la partie droite. Plusieurs études ont observé l'effet de la distribution de l'information sur le phénomène OVP ([O'Regan et al., 1984](#); [Brysbaert et al., 1996](#); [Farid & Grainger, 1996](#)) et leurs résultats montrent que, pour des mots ayant une fin plus informative, l'asymétrie est diminuée, voire annulée mais sans toutefois être inversée. Il est important de noter que toutes ces expériences sur l'influence de la position du regard dans les mots se concentrent sur les phénomènes observés en conditions de lecture normales, c'est-à-dire lorsque les stimuli sont alignés verticalement avec la fovéa. On sait que l'excentricité verticale influence la visibilité des lettres et la taille de l'empan visuel ([Legge et al., 2001](#)). Pourtant, jusqu'à présent, seule une étude a tenté d'explorer les effets de l'excentricité visuelle sur le phénomène OVP, et les résultats sont difficilement interprétables du fait notamment d'effets de plafond ([Battista & Kalloniatis, 2002](#); voir Chapitre 5).

2-3-2 – Les contraintes visuelles sous-tendant le phénomène OVP

Deux hypothèses principales ont été proposées pour rendre compte de la forme générale, mais aussi de l'asymétrie du phénomène OVP. La première suggère que la reconnaissance d'un mot dépend uniquement de la visibilité des lettres le constituant ; plus le nombre de lettres reconnues est important, plus la quantité d'information disponible est importante et plus la probabilité d'identifier le mot correctement est élevée. Selon cette hypothèse, la supériorité des performances pour des positions de fixation dans la partie centrale des mots serait simplement due au fait que fixer le centre des mots permettrait d'extraire un maximum de lettres en une seule fixation, les lettres du mot tombant pour la plupart dans l'empan visuel. Lorsque le regard est décalé horizontalement par rapport au centre du mot, la diminution de l'acuité visuelle et l'augmentation de l'encombrement limitant la visibilité des lettres les plus éloignées, entraîneraient une diminution des performances de reconnaissance du mot.

Pour confirmer cette hypothèse, McConkie et al. (1989) ont proposé un modèle de reconnaissance de mots basé uniquement sur le principe selon lequel (1) la probabilité de reconnaissance d'un mot dépend directement de la visibilité des lettres le constituant, et (2) la visibilité des lettres diminue de façon linéaire lorsque l'excentricité horizontale augmente. Dans ce modèle, la visibilité d'une lettre, ou plutôt la quantité d'information qu'elle apporte, est exprimée par une valeur comprise entre 1 et 0. Les auteurs attribuent, de manière arbitraire, la valeur 1 à la lettre située au niveau de la fovéa, puis retranchent à chaque fois 0,1 pour les lettres adjacentes. La quantité d'information disponible sur le mot pour une position de fixation donnée est obtenue en faisant la somme des valeurs de chaque lettre ; plus cette quantité d'information est élevée, plus la probabilité de reconnaître le mot sera importante. Le Tableau 2.1 donne la quantité d'information disponible pour un mot de sept lettres en fonction de la position horizontale de fixation ; la valeur maximale est atteinte lorsque l'on fixe la lettre centrale du mot. Grâce à ce modèle simple, McConkie et al. (1989) parviennent à faire le lien entre la diminution linéaire de la visibilité des lettres et la diminution quadratique de la probabilité de reconnaissance d'un mot en fonction de la position horizontale du regard (cf. Figure 2.11, courbe bleue). Néanmoins, leur modèle ne rend pas compte de l'asymétrie des courbes OVP. Un autre problème posé par ce modèle est qu'en ajoutant le score de visibilité de chaque lettre, la probabilité d'identifier un mot augmente avec sa longueur, ce qui n'est pas le cas dans les données empiriques.

Position horizontale de fixation	Position de la lettre dans le mot							Information disponible sur le mot
	1	2	3	4	5	6	7	
	Information apportée par chaque lettre							
-3	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	4.9
-2	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	5.4
-1	0.8	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.6	5.7
0	0.7	0.8	0.9	1	0.9	0.8	0.7	5.8
1	0.6	0.7	0.8	0.9	1	0.9	0.8	5.7
2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	0.9	5.4
3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	4.9

Tableau 2.1 – Performances de reconnaissance prédites par le modèle de McConkie et al. (1989) pour un mot de sept lettres. La quantité d'information disponible pour le mot est maximale lorsque le regard fixe la lettre centrale, puis diminue de manière non-linéaire lorsque l'on s'éloigne de cette position optimale.

Pour pallier ces deux problèmes, Nazir et al. (1991) ont proposé un autre modèle, reposant à nouveau sur l'hypothèse que la visibilité des lettres est le seul facteur limitant, mais présentant deux différences majeures par rapport au modèle de McConkie et al. (1989). Premièrement, la quantité d'information extraite sur un mot n'était pas la somme, mais le produit de la visibilité de chacune des lettres du mot. Deuxièmement, la visibilité des lettres, plutôt qu'être choisie de manière arbitraire, était calculée à partir de valeurs empiriques obtenues dans une expérience préalable d'identification de lettres présentées dans des chaînes de caractères. Leurs données montraient bien une diminution linéaire de la probabilité d'identification d'une lettre en fonction de la distance de fixation, mais avec la pente était 1,8 fois plus importante lorsque la lettre était présentée à gauche plutôt qu'à droite du point de fixation. Ils ont donc choisi d'attribuer la valeur 1 à la lettre fixée et d'utiliser un critère de diminution différent selon le côté de présentation de la lettre tout en conservant un ratio gauche/droite de 1,8/1 (e.g. 0,029/0,016, cf. Tableau 2.2). La forme des courbes ainsi obtenues (cf. Figure 2.11, courbe verte) suggère que l'effet de supériorité du champ visuel droit (*RVF advantage*) pour l'identification de lettres peut rendre compte de l'asymétrie des courbes OVP. De plus, du fait de la multiplication et non l'addition des scores de chacune des lettres, ce modèle parvient aussi à prédire un effet négatif de la longueur du mot sur le niveau global des performances, comme c'est le cas dans les données empiriques.

Position horizontale de fixation	Position de la lettre dans le mot							Information disponible sur le mot
	1	2	3	4	5	6	7	
-3	1	0.984	0.968	0.952	0.936	0.92	0.904	0.71
-2	0.971	1	0.984	0.968	0.952	0.936	0.92	0.76
-1	0.942	0.971	1	0.984	0.968	0.952	0.936	0.78
0	0.914	0.942	0.971	1	0.984	0.968	0.952	0.76
1	0.885	0.914	0.942	0.971	1	0.984	0.968	0.70
2	0.856	0.885	0.914	0.942	0.971	1	0.984	0.62
3	0.827	0.856	0.885	0.914	0.942	0.971	1	0.52

Tableau 2.2 – Probabilités de reconnaissance prédites par le modèle de Nazir et al. (1991) pour un mot de sept lettres. La probabilité est maximale lorsque le regard fixe la lettre située à gauche de la lettre centrale. La diminution des performances est plus importante lorsque le regard fixe à droite qu'à gauche du centre.

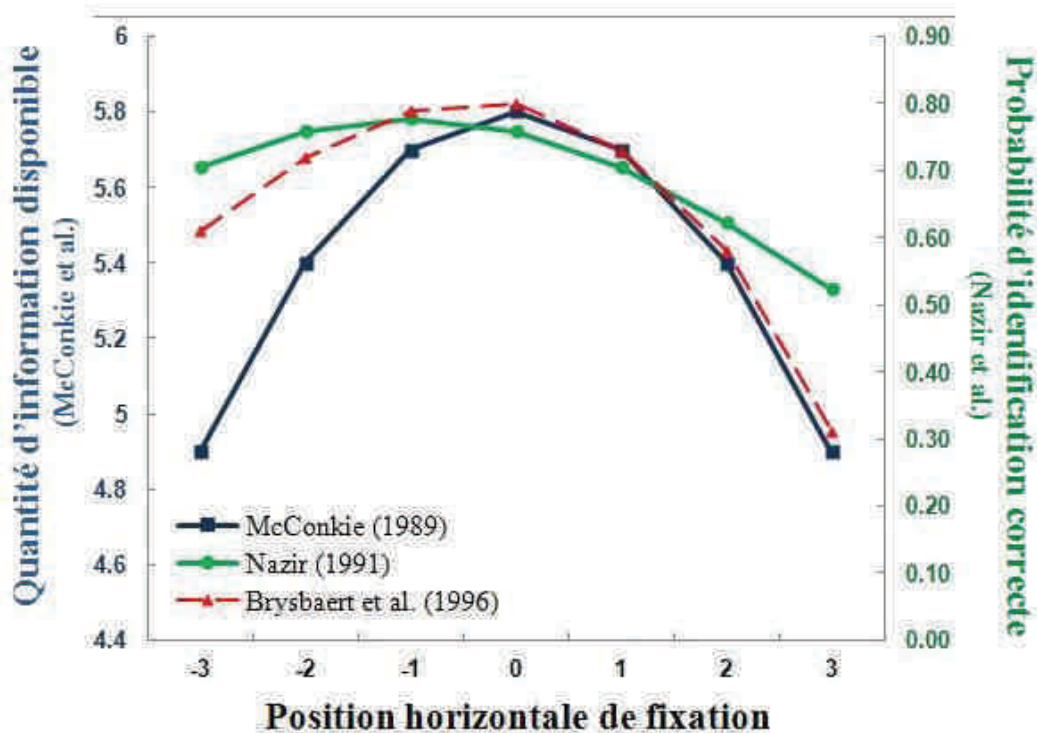


Figure 2.11 – Courbes des performances de reconnaissance d'un mot de sept lettres prédites par les modèles de McConkie et al. (1989) en bleu et de Nazir et al. (1991) en vert. La courbe rouge représente les données empiriques obtenues par Brysbaert et al. (1996) pour des mots de sept lettres affichés durant 28 ms.

De façon complémentaire, plusieurs expériences ont testé si la forme de l'effet OVP variait en fonction de la visibilité des lettres. Dans une première expérience, Nazir et al. (1992) ont testé l'influence de l'espacement entre les caractères. Leur hypothèse était qu'une augmentation de l'espacement devrait entraîner une diminution de la visibilité des lettres situées en périphérie, et par conséquent, une augmentation des pentes des courbes OVP. Les résultats obtenus montrent en effet une augmentation des pentes des courbes OVP avec la taille de l'espace inter-caractères (de 0,06° à 0,30° pour des lettres de 0,18° de largeur) en particulier pour les mots les plus longs (7 et 9 lettres). Pour les mots courts (5 lettres), en revanche, cet effet est beaucoup moins marqué, même lorsque le temps de présentation est diminué de 115 à 85ms pour éviter les effets de plafond. Cela peut être attribué au fait que l'effet de l'encombrement n'était pas pris en compte dans l'expérience. En effet, élargir l'espace entre les caractères certes augmente l'excentricité des lettres, mais d'un autre côté, cela augmente aussi la distance entre une lettre et ses « *flankers* » ce qui réduit l'effet de l'encombrement (Pelli et al., 2004), et peut compenser la diminution des performances dans le cas des mots courts. En 1998, Nazir et al. ont tenté d'égaliser la visibilité de toutes les lettres du mot cible en compensant la diminution de l'acuité visuelle par une augmentation de la taille des caractères. Chaque lettre du mot était agrandie proportionnellement à sa distance par rapport au point de fixation d'un facteur égal à $1 + m\Omega$, avec Ω , l'excentricité de la lettre en degrés et m variant de 0.5 à 1,7 selon la condition expérimentale. Selon l'hypothèse « visuelle », si la visibilité est la même pour toutes les lettres du mot, l'effet OVP devrait être annulé et les courbes de probabilité d'identification en fonction de la position horizontale de fixation devraient avoir une pente nulle. Les résultats étaient conformes aux prédictions pour les mots courts de 5 lettres, mais pas pour les mots plus longs de 9 lettres pour lesquels l'effet OVP restait inchangé. Les auteurs en ont conclu que l'acuité visuelle n'était pas le seul facteur responsable de l'effet OVP et ont proposé une explication en termes d'apprentissage perceptif. Lors de la lecture normale, les lettres les plus excentrées sont traitées de façon rapide et grossière mais apportent toutefois des informations importantes sur le mot (longueur, forme). L'augmentation progressive de la taille des lettres en fonction de leur excentricité n'aurait pour conséquence que de perturber ce traitement automatique en périphérie et contrerait l'effet inverse de la magnification, laissant l'effet OVP inchangé.

2-3-3 – Les contraintes orthographiques liées au phénomène OVP

La deuxième hypothèse explicative du phénomène de position optimale du regard attribue la forme générale des courbes aux contraintes orthographiques qui s'exercent lors de la lecture de mots. Nous avons vu précédemment que l'asymétrie des courbes pouvait changer selon que la partie la plus informative était au début ou à la fin d'un mot ([Brysbaert et al., 1996](#); [Farid & Grainger, 1996](#)). Néanmoins, l'argument le plus fort revient aux études ayant montré qu'il est aussi possible d'approcher la forme générale de l'effet OVP en se basant uniquement sur le partage orthographique des mots du lexique. Ainsi, Clark et O'Regan ([1999](#)) ont proposé un modèle par lequel ils ont montré qu'ils pouvaient reproduire la forme des courbes OVP en maintenant constante la quantité d'information extraite sur le mot, et en mesurant simplement l'ambiguïté lexicale à partir du nombre de mots partageant les lettres extraites. Pour exemple, ils ont considéré des contraintes d'acuité visuelle minimales, et que seules quatre lettres du mot sont extraites à chaque fixation, et ce quelle que soit sa longueur et la position de la fixation : les deux lettres les plus proches du point de fixation, où l'acuité visuelle est maximale, et les deux lettres extrêmes du mot, moins sujette à l'effet d'encombrement. Pour chaque combinaison de ces quatre lettres, ils ont calculé une valeur d'ambiguïté, à savoir le nombre de mots du lexique (environ 210 000 en anglais et 60 000 en français) partageant les quatre lettres. Leurs résultats ont montré que l'ambiguïté variait en fonction de la position horizontale de fixation de la même manière que les performances de reconnaissance de mots (mais de manière inversée), avec la même asymétrie droite/gauche et un maximum correspondant à une position légèrement à gauche du centre. La Figure 2.12 est un exemple du modèle de Clark et O'Regan appliqué au mot « GRISAILLE » représentatif de la tendance générale observée par les auteurs sur l'ensemble des mots du lexique.

Position horizontale de fixation	Combinaison de lettres visibles	Nombre de candidats dans le lexique*	Autre candidat possible
-3.5	GR*****E	49	grandisse
-2.5	GRT*****E	10	grillagée
-1.5	G*IS*****E	5	glissante
-0.5	G**SA***E	1	grisaille
0.5	G***AI**E	3	grenaille
1.5	G****IL*E	8	groseille
2.5	G*****LLE	12	gazouille
3.5	G*****E	20	gaudriole

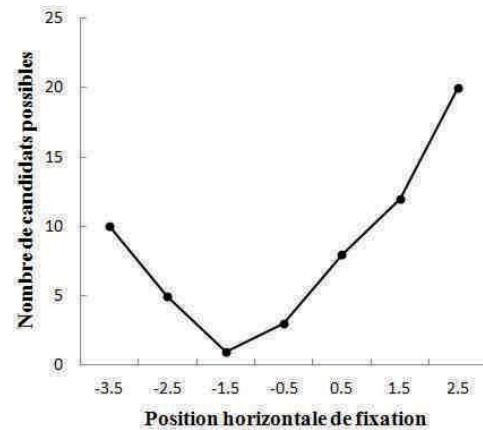


Figure 2.12– Exemple de fonctionnement du modèle de Clark et O’Regan (1999) pour un mot de 9 lettres (GRISAILLE). Le tableau donne le nombre de candidats possibles pour chaque position de fixation, ainsi qu’un exemple de mot compatible avec chaque combinaison de lettres. Le graphique représente, la valeur de l’ambiguïté, à partir du nombre de candidats possibles, en fonction de la position de fixation.

*Le nombre de candidats du lexique a été obtenu à partir de la base de données LEXIQUE 3 (www.lexique.org/, New et al., 2001)

De la même manière, mais cette fois-ci en étudiant les variations de la vitesse de lecture en RSVP, Legge et al. (2001) ont montré qu’il était possible d’approcher les performances de lecture en combinant la probabilité de reconnaissance de lettres à l’information lexicale. Dans leur modèle, la probabilité de reconnaissance de chaque lettre du mot cible était prédite à partir des courbes de visibilité des lettres présentées à la Figure 2.8 et l’influence lexicale était déterminée à partir de deux règles d’appariement : une règle d’appariement exacte, qui nécessitait l’identification correcte de toutes les lettres du mot pour que celui-ci soit identifié, et une règle d’appariement dite « idéale » qui permettait au modèle de reconnaître le mot même si certaines de ces lettres n’avaient pas été identifiées (inférence lexicale). Leurs résultats ont montré que les performances de lecture en vision centrale étaient proches des valeurs prédites grâce à la règle d’appariement exacte, mais lorsque l’excentricité verticale du mot augmentaient, elles se rapprochaient plus des valeurs prédites par la règle d’appariement utilisant l’inférence lexicale. Les auteurs ont donc conclu que la visibilité des lettres était le principal facteur limitant la reconnaissance des mots, mais que lorsque les mots étaient présentés en vision périphérique, c’est-à-dire lorsque la probabilité d’identification de lettres était trop basse, l’information lexicale pouvait être utilisée pour compenser le manque d’information visuelle.

2-4– COMPORTEMENT OCULOMOTEUR ET LECTURE DE TEXTE

Lors de la lecture d'un texte, nous fixons généralement un mot pendant environ 200 à 250 ms en moyenne, durée pendant laquelle l'information disponible est au moins en partie traitée. Puis nous effectuons le plus souvent une saccade vers l'avant, bien que dans environ 10% des cas, nos yeux retournent en arrière à l'aide d'une saccade dite régressive. L'amplitude des saccades se définit en nombre de lettres du fait de l'absence présumée d'un effet de la taille angulaire des caractères sur l'amplitude des saccades ([Lamarre, 1892](#); [Morrison & Rayner, 1981](#); [O'Regan, 1990](#)), point sur lequel nous reviendrons au Chapitre 7 ; celle-ci est en moyenne de 6 à 9 caractères, lorsqu'elle entraîne les yeux vers l'un des mots suivants. Mais ce comportement n'est pas totalement invariant, il peut être influencé par de nombreux facteurs, et il n'est pas rare qu'un mot soit sauté ou encore refixé ([Rayner, 1998](#)). De plus, durant la lecture d'un texte, nous n'effectuons pas uniquement des saccades progressives ; il nous arrive aussi de faire des saccades vers l'arrière (ou régressives), pour fixer un mot précédent, le plus généralement un mot qui a été sauté ([Vitu & McConkie, 2000](#)), ou pour passer à la ligne suivante (retour à la ligne). La première partie de cette section consiste en une présentation des principales théories du guidage oculaire pendant la lecture. Nous décrirons ensuite les effets observés sur le comportement oculomoteur intra et inter-mots, les facteurs qui peuvent les influencer ainsi que les théories générales qui peuvent en rendre compte.

2-4-1 – Les modèles du guidage oculaire durant la lecture

2-4-1-1 - Les premières théories du guidage oculaire

Les plus anciennes théories explicatives du comportement oculaire lors de la lecture datent du début du XX^{ème} siècle ([Huey, 1908](#) voir aussi [Kolers, 1976](#)). Ces théories dites « **minimalistes** », suggèrent que les mouvements des yeux seraient déterminés uniquement par le système oculomoteur, sans aucune intervention des facteurs visuels ou linguistiques. L'hypothèse est que le temps laissé pour le traitement de l'information lors d'une fixation, étant donné le temps de programmation d'une saccade serait trop court pour influencer l'amplitude de la prochaine saccade, et par conséquent que les yeux se déplaceraient de façon autonome et rythmée (par pas de taille constante et à intervalles réguliers), indépendamment des traitements cognitifs en cours.

Au vu de certaines observations montrant, que les durées des fixations et les amplitudes de saccades pouvaient être influencées par des facteurs de haut niveau tels que la complexité ou la prédictibilité du texte ([Haber, 1976](#)), certains auteurs ont proposé que les mouvements des yeux soient certes principalement déterminés par le système oculomoteur, mais qu'ils puissent aussi être contrôlés de manière indirecte, globale, par les facteurs linguistiques ([Bouma & De Voogd, 1974](#); [Haber, 1976](#)). Bien que moins extrêmes que les modèles minimalistes, ces théories de type « **contrôle indirect** » ne sont cependant pas suffisantes pour expliquer par exemple comment la fréquence du mot fixé peut influencer directement le temps de fixation sur ce mot, comme montré dans de nombreuses études ultérieures.

Les théories de type « **contrôle direct** » en revanche, supportent l'hypothèse diamétralement opposée selon laquelle le traitement visuel et linguistique des mots déterminerait à lui seul, et en temps réel, le comportement oculomoteur ([McConkie, 1979](#); [Just & Carpenter, 1980](#); [Morrison, 1984](#)). Elles ont pour origine l'hypothèse de McConkie ([1979](#)) d'un guidage par empan perceptif, selon laquelle c'est le temps de traitement des lettres et mots contenus dans l'empan qui déclenche une nouvelle saccade vers le centre de l'empan suivant. Mais l'un des problèmes posés par cette théorie, est tout simplement que l'amplitude moyenne des saccades dans la lecture entraîne le chevauchement des empans d'une fixation à l'autre. C'est pourquoi, dans les modèles suivants, l'unité de traitement n'est pas l'empan perceptif, mais le mot. La théorie proposée par Just et Carpenter ([1980](#)) suppose que les yeux se déplacent vers le centre du mot suivant et que la saccade ne se déclenche qu'une fois que le mot fixé a été identifié et intégré au contexte syntaxique et sémantique de la phrase. Dans cette théorie, le temps total de regard sur les mots (« *gaze duration* » en anglais) est sous l'influence directe du traitement cognitif mais l'amplitude des saccades est plutôt influencée par des facteurs visuels. Enfin, la théorie proposée par Morrison ([1984](#)) est plus proche de certains des modèles actuels car contrairement aux deux théories précédentes, elle prend en compte la possibilité d'un prétraitement des mots situés en parafovéa. Elle suppose que la programmation d'une saccade du mot n au mot $n+1$ ne commence qu'une fois que le mot situé en fovéa (n) a été identifié et que l'attention s'est déplacée vers le mot suivant ($n+1$). Un prétraitement parafovéal est donc possible durant la phase de programmation saccadique, et lorsqu'il est suffisamment rapide, il entraîne un saut de mot. Ces théories sont à l'origine des modèles récents dits « à dominante cognitive » dans lesquels les durées des fixations et la

métrique des saccades sont déterminées en premier lieu par le traitement fovéal et parafovéal des mots.

Parallèlement à ces théories plutôt cognitives, certains auteurs soutiennent des hypothèses différentes, plus en faveur d'un rôle prépondérant des facteurs oculomoteurs et visuels. C'est le cas notamment de la théorie '**Stratégies-tactiques**' proposé par O'Regan et Lévy-Schoen (1987) qui suggère que l'amplitude des saccade repose principalement sur des stratégies visuomotrices acquises durant l'apprentissage de la lecture. La stratégie adoptée automatiquement par les lecteurs est de viser le centre du mot suivant afin de s'approcher de la position optimale de fixation pour la reconnaissance du mot (voir Section 2-4-3-2). Si le point d'atterrissage de la saccade est trop loin de cette position, une tactique intra-mot est utilisée : la durée de la fixation est raccourcie et le regard effectue une nouvelle fixation sur l'autre moitié du mot.

Les théories présentées ici, qu'elles soient à dominante cognitive ou visuomotrice, s'orientent toutes vers une interprétation mixte des mécanismes : le comportement oculomoteur serait déterminé à la fois par des régularités oculomotrices et par des facteurs visuels et cognitifs. Les modèles proposés à l'heure actuelle complètent ces théories en y ajoutant l'interprétation de phénomènes découverts plus récemment et basés sur des observations plus précises du comportement oculomoteur intra et inter-mots.

2-4-1-2 - Les modèles à l'heure actuelle

Bien qu'ils soient tous considérés comme « mixtes », les modèles récents du guidage oculaire peuvent être classés en deux grandes catégories : ceux à dominante visuo-motrice, dans lesquels les mouvements des yeux sont principalement déterminés par les facteurs « bas-niveau » et ceux à dominante cognitive, où les facteurs lexicaux et sémantiques jouent un rôle plus important (cf. Tableau 2.3). Mais au-delà de cette classification, ces modèles diffèrent principalement sur trois questions, (1) comment est déterminée la latence des saccades, (2) comment est déterminée la position d'atterrissage, et (3) comment s'effectue le traitement des mots adjacents (de manière séquentielle ou en parallèle). Les particularités de chaque modèle sont résumées dans le Tableau 2.3 (pour une revue voir [Vitu, 2007](#)).

Facteurs cognitifs oculomoteurs et visuels	Type	Durée des fixations	Cible	Position d'atterrissage des saccades	Traitement des mots
Compétition Interaction (Yang, 2006)	VM	horloge interne et régulation par l'inhibition saccadique	pas de cible	stratégies oculomotrices et inhibition saccadique	parallèle
SERIF (McDonald et al., 2005)	VM	Compétition lexicale inter-hémisphérique	centre des mots	Sélection probabiliste + erreurs de gamme	séquentiel
E-Z reader (Reichle et al., 1998)	C	temps de traitement fovéal et program. saccadique	centre des mots	prétraitement parafovéal + erreurs de gamme	séquentiel
SWIFT (Engbert et al., 2005)	C	horloge interne et inhibition fovéale	centre des mots	saillance lexicale + erreurs de gamme	parallèle
Glenmore (Reilly & Radach, 2003)	C	stimulation fovéale	centre des mots	saillance lexicale + erreurs de gamme	parallèle
MrChips (Legge et al., 1997)	C	pas d'aspect temporel	position optimale	empan visuel et fréquence lexicale	parallèle

Tableau 2.3– Tableau récapitulatif des principaux modèles du guidage oculaire lors de la lecture.

Les deux premiers sont considérés comme des modèles à dominante visuomotrice (VM) et les quatre derniers comme des modèles plutôt cognitifs (C). Sont indiqués les principaux facteurs cognitifs (en bleu), oculomoteurs (en rouge) et visuels (en vert) influençant la durée des fixations et l'amplitude des saccades.

Compétition-Interaction est un modèle essentiellement visuo-moteur (Yang & McConkie, 2001; Yang, 2006). Dans ce modèle, la durée des fixations dépend d'un générateur de saccades propre au système oculomoteur (ou horloge interne), qui, par défaut, déplace le regard vers l'avant à intervalles réguliers. L'amplitude des saccades dépend, elle, de stratégies visuomotrices (ou biais oculomoteur) acquises lors de l'apprentissage de la lecture ; le regard va avoir tendance à effectuer des saccades vers l'avant d'amplitude constante, indépendamment des frontières entre les mots. Si au bout d'un certain temps de fixation, le système rencontre une difficulté liée au traitement visuel ou lexical du mot fixé, il peut déclencher un phénomène d'« inhibition saccadique ». Cela va entraîner une augmentation du temps de fixation ainsi que l'interruption de la progression vers l'avant par pas constants, résultant donc en l'exécution d'une saccade progressive plus courte, ou d'une saccade régressive.

SERIF est aussi considéré comme un modèle visuomoteur (McDonald et al., 2005). Les aspects temporel et spatial y sont codés par deux systèmes différents. La durée des fixations dépend principalement de la compétition entre deux unités de génération saccadique dépendant respectivement du traitement des informations lexicales dans les deux hémisphères

cérébraux, et reliées entre elles par des connexions inhibitrices. Une saccade est déclenchée lorsque la compétition est résolue, à savoir le mot est reconnu. Le point d'atterrissage des saccades dépend, lui, principalement de la configuration visuelle parafovéale. Il propose, comme Brysbaert et Vitu (1998), que la probabilité de sauter le mot n+1 dépend principalement de facteurs visuels et de l'expérience perceptive des lecteurs. A partir de la longueur et de l'excentricité du mot suivant, le système va estimer la probabilité que le mot parafovéal soit identifié afin de déterminer le mot cible de la prochaine saccade. Si le mot n+1 est court et/ou proche du point de fixation, la probabilité qu'il soit identifié durant la phase de programmation saccadique est élevée, et le système va directement programmer une saccade vers le mot n+2. Autrement, le regard se dirigera vers le mot n+1. Enfin, le traitement lexical des mots ne se fait pas de manière strictement parallèle; les lettres au sein de l'empan sont traitées dans une certaine mesure en parallèle, mais leur traitement progresse plus ou moins rapidement selon leur excentricité, rendant quasiment impossible le traitement en parallèle de deux mots adjacents.

Le modèle *E-Z reader* (Reichle et al., 1998), à forte dominante cognitive, ressemble beaucoup au modèle proposé par Morrison (1984). Le traitement se fait de manière séquentielle par déplacements de l'attention visuelle d'un mot à l'autre et la durée des fixations et l'amplitude des saccades sont principalement déterminées par le traitement lexical et sémantique. La programmation saccadique est composée de deux phases de durée fixe, une première phase labile (pendant laquelle la saccade peut être modifiée) et une deuxième phase non labile. La première phase de programmation saccadique commence une fois que la première étape de traitement du mot (L1 ou « *word familiarity check* ») est achevée. Le prétraitement du mot n+1 peut se dérouler en même temps que la programmation saccadique, mais ne peut néanmoins démarrer que lorsque le traitement du mot fixé a atteint le niveau L2 (identification), et par conséquent que l'attention s'est déplacée du mot n vers le mot n+1. Dans les cas où l'identification du mot n (L1+L2) et le premier niveau de traitement du mot n+1 (L1) se terminent avant la fin de la phase labile de programmation de la saccade, la saccade initialement prévue peut être annulée et le système peut initier une nouvelle saccade vers le mot n+2.

Les modèles *SWIFT* (Engbert et al., 2005) et *Glenmore* (Reilly & Radach, 2006), en revanche, permettent à la fois un déploiement de l'attention sur plusieurs mots simultanément et un déroulement en parallèle du traitement orthographique et de la programmation saccadique. Le modèle *SWIFT*, bien que considéré comme un modèle à dominante cognitive,

suggère que l'aspect temporel des mouvements oculaires est principalement déterminé par le système oculomoteur : les saccades sont déclenchées au bout d'une durée variable aléatoire (horloge interne au système) mais peuvent toutefois être retardées (par un processus d'inhibition fovéale) si le traitement du mot fixé s'avère difficile. Dans ces deux modèles, l'attention se déploie sur plusieurs mots simultanément et le système sélectionnera comme cible le mot qui sera le plus « saillant » au moment de la programmation de la saccade. Dans le modèle *SWIFT*, il s'agit de saillance lexicale uniquement; la saillance lexicale d'un mot est fonction de l'avancée de son traitement; elle est faible si le mot est en passe d'être identifié, et plus élevée si le traitement du mot est entamé mais n'a pas encore atteint un certain seuil d'identification.

MrChips ([Legge et al., 1997b](#)) est un modèle particulier notamment parce qu'il n'a pas pour but d'approcher les données empiriques mais plutôt de modéliser le comportement oculaire d'un observateur « idéal » qui identifierait les mots avec un nombre minimum de saccades. Lors d'une fixation, l'observateur va se baser sur des informations visuelles (empan perceptif) et lexicales (fréquence relative des mots) pour programmer une saccade vers une position permettant de diminuer au maximum l'ambiguïté de l'information, c'est-à-dire d'augmenter la probabilité de reconnaître le mot suivant lors de la prochaine fixation. Dans ce modèle, le regard n'a donc pas pour but de viser le centre d'un mot cible, mais va atterrir à une position située à la limite de l'empan visuel dans le but de compléter au mieux l'information perçue précédemment (voir aussi l'hypothèse de guidage par empan perceptif proposée par [McConkie, 1979](#)). Notons enfin que *MrChips* ne prend pas en compte l'aspect temporel des mouvements oculaires car il a plutôt été développé dans le but d'évaluer les conséquences d'une réduction de l'empan visuel sur l'amplitude des saccades. C'est d'ailleurs le premier modèle capable de rendre compte du comportement oculaire des patients porteurs d'un scotome central (pour un modèle plus récent voir [Bernard et al., 2008](#)).

En résumé, notons que, dans la plupart des modèles (*SERIF*, *EZ reader*, *SWIFT* et *Glenmore*), la sélection de la cible se fait de manière discrète (la cible est un mot) et que le regard vise le centre du mot cible. Dans les autres modèles, en revanche, l'amplitude des saccades est principalement déterminée par des régularités oculomotrices (*Competition-Interaction*) ou par des facteurs visuels (*MrChips*); même si le centre des mots s'avère être la position la plus fréquemment fixée (voir Section [2-4-3-1](#)), il n'y est pas défini a priori comme la cible de la saccade. La dispersion des positions d'atterrissage est quant à elle, expliquée par l'action combinée d'un ou plusieurs de ces facteurs : une influence du contenu parafovéal

(visuel et/ou lexical), des imprécisions du système oculomoteur, mais de façon prépondérante dans les modèles Glenmore, SERIF, SWIFT et E-Z reader, des erreurs systématiques, dites « erreurs de gamme », qui reflètent la tendance à effectuer des saccades d'une amplitude constante, optimale pour la tâche de lecture, ([McConkie et al., 1988](#) ; voir Section [2-4-3-2](#))

Les modèles décrits ici reposent sur les observations des régularités du comportement oculomoteur que nous allons décrire à présent, mais nous verrons qu'ils ne peuvent pas tous rendre compte des phénomènes observés.

2-4-2 – Les déterminants du comportement oculomoteur intra-mots

Les variables liées au comportement oculaire dit « intra-mot », sont : la durée des fixations, la probabilité de refixation et le temps total de fixation sur le mot. Dans une tâche de lecture de texte, la durée d'une fixation, c'est-à-dire le temps compris entre deux saccades, est en moyenne de 225 ms, mais elle peut varier de 100 à 500 ms selon les sujets et les caractéristiques du texte. Il arrive parfois qu'une saccade atterrisse sur le même mot que lors de la fixation précédente, on parle alors de refixation. Ceci arrive dans environ 15% des cas. La troisième variable étudiée dans le comportement oculomoteur « intra-mot » est le temps total de regard sur le mot (aussi appelé « *gaze duration* » en anglais) qui est la somme des durées de toutes les fixations consécutives effectuées sur le mot (lors d'un premier passage sur le mot). Cette variable, proposée par certains auteurs comme indice du temps de reconnaissance du mot ([Just & Carpenter, 1980](#); voir Section [2-4-1-1](#)), présente l'inconvénient de combiner durée de fixation et probabilité de refixation, deux variables qui ne sont pas forcément influencées par les mêmes facteurs ([Vitu & O'Regan, 2004](#)). De plus, il a été montré que le temps total de regard sur le mot augmente avec le nombre de fixations, mais pas de manière proportionnelle. Les fixations sont généralement plus courtes lorsque l'on effectue une refixation sur le mot ([Vitu & O'Regan, 1995](#); [Vitu et al., 2001](#)), ce qui fait qu'un mot refixé n'est pas forcément vu deux fois plus longtemps qu'un mot fixé une seule fois.

2-4-2-1 – Facteurs influençant le comportement intra-mots

Comme les performances de reconnaissance, le comportement oculomoteur intra-mots peut être influencé par des facteurs linguistiques et visuels. Les facteurs linguistiques influençant le comportement oculomoteur intra-mots sont **la fréquence des mots, le**

prétraitement parafovéal et la prédictibilité du texte (pour une revue voir [Rayner, 1998](#)). Que ce soit dans la lecture de textes ou de phrases, il a été montré que la probabilité de refixation, les durées des fixations individuelles ainsi que le temps total de regard sur le mot étaient plus élevés (1) pour les mots de basse que pour les mots de haute fréquence ([Vitu et al., 2001](#); [Nuthmann et al., 2005](#)), (2) lorsque le mot n'a pas pu être préalablement vu en vision périphérique ([Balota et al., 1985](#)) et/ou (3) lorsqu'il ne peut pas être prédit grâce au contexte sémantique de la phrase ([Vitu, 1991c](#); [Kliegl et al., 2004](#)). Les effets des facteurs linguistiques ne s'observent pas uniquement sur le comportement oculomoteur « immédiat ». Le comportement oculomoteur lorsque le regard fixe le mot 'n' peut être influencé par les caractéristiques du mot précédent. Cet effet dit « de débordement » (ou « *spillover* » en anglais), a été mis en évidence par Rayner et Duffy ([1986](#)) qui ont montré qu'un nom précédé d'un adjectif de basse fréquence était en moyenne fixé plus longtemps que lorsqu'il était précédé d'un adjectif de haute fréquence (pour une revue voir [Pollatsek et al., 2008](#)). Selon Reichle et al. ([1998](#)), ces effets plus ou moins immédiats des facteurs linguistiques reflèteraient les différentes étapes de l'accès au lexique pour les mots rencontrés (voir aussi [Perea & Pollatsek, 1998](#)). Ils suggèrent aussi qu'un mot n'est pas toujours complètement identifié lorsque les yeux le quittent, ce qui est en contradiction avec l'hypothèse d'un contrôle strictement cognitif et direct des mouvements des yeux, tel que proposé dans le modèle *E-Z reader*. Des effets des propriétés du mot parafovéal (n+1) sur le temps de fixation (sur le mot n) ont aussi été mis en évidence dans de nombreuses expériences sur la reconnaissance de mots ou la lecture de texte (pour une revue voir [Kennedy et al., 2002](#); [Vitu et al., 2004a](#); [Kennedy & Pynte, 2005](#)). Ils peuvent, selon les caractéristiques des mots 'n' et 'n+1', se traduire par une augmentation ou une diminution de la durée de fixation. Ces résultats constituent la preuve que le traitement lexical peut s'effectuer en parallèle sur plusieurs mots et que l'attention peut être dissociée de la zone de fixation, contrairement à l'hypothèse proposée par *E-Z reader* et en accord avec des modèles tels que *SWIFT*.

Les variables reflétant le comportement oculomoteur intra-mots sont aussi affectées par des facteurs visuels, notamment la longueur des mots et la position de regard dans le mot. La durée des fixations, la probabilité de refixation ainsi que le temps total de regard sur le mot augmentent tout d'abord en fonction de la **longueur du mot** fixé ([Vitu et al., 2001](#); [Kliegl et al., 2004](#); [Nuthmann et al., 2005](#)). Cet effet de la longueur des mots pourrait s'expliquer en termes d'empan visuel : si l'on refixe un mot à un endroit différent c'est notamment parce que l'ensemble des lettres n'a pas pu être identifié en une seule fixation. La question reste de

savoir s'il s'agit d'un effet online du traitement ou bien s'il résulte de stratégies visuomotrices prédéterminées (e.g. [O'Regan, 1990](#)).

Le deuxième facteur visuel agissant sur le comportement oculaire intra-mot est la **position du regard dans le mot**. De la même manière que l'effet OVP observé sur les performances de reconnaissance, on observe un effet de la position de la fixation initiale dans le mot sur la probabilité de refixation (ou « *refixation-OVP effect* ») et sur le temps total de regard sur le mot (« *gaze-duration OVP effect* ») ([O'Regan et al., 1984](#); [Holmes V. M. & O'Regan, 1987](#)), avec cependant un effet atténué dans la lecture de texte pour le temps total de regard ([Vitu et al., 1990](#); voir aussi [McConkie et al., 1989](#)). Les courbes représentant la probabilité de refixation ou le temps total de regard en fonction de la position de la première fixation dans le mot sont donc en forme de U, avec un **minimum** correspondant à une position légèrement à **gauche** du centre du mot (cf. Figure 2.13a). De façon plus surprenante et a priori contre-intuitive, les durées des fixations individuelles sont **plus longues**, et non pas plus courtes, lorsque l'on fixe le centre que lorsque l'on fixe le début ou la fin des mots (cf. Figure 2.13b). Cet effet qui a d'abord été mis en évidence par O'Regan et Lévy-Schoen ([1987](#)) pour la durée de la première fixation d'une série de deux fixations consécutives sur un mot, s'est ensuite révélé comme se généralisant à toutes les fixations initiales sur un mot, quel que soit le nombre de fixations sur le mot, et dans une certaine mesure aussi à la durée de la seconde fixation dans les cas de refixations ([Vitu et al., 2001](#); [2007](#)). Il est connu sous le nom d'effet de **position optimale du regard inversée** (ou **I-OVP** pour « *Inverted Optimal Viewing Position* »).

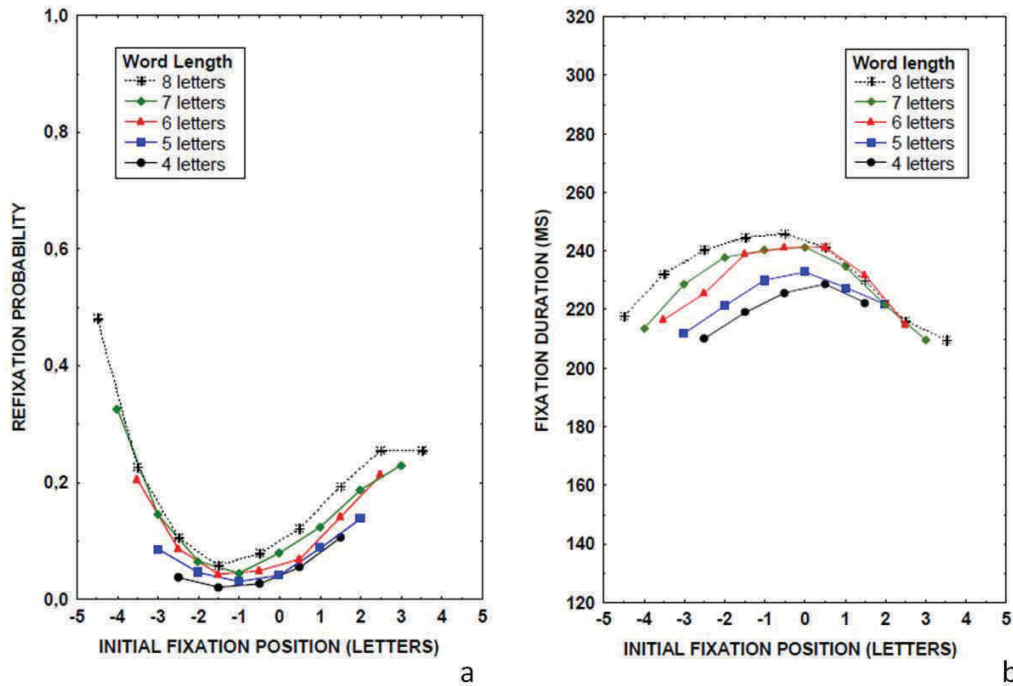


Figure 2.13 – Observations du comportement oculomoteur intra-mots (Vitu et al., 2001).

(a) Phénomène OVP mis en évidence sur la probabilité de refixation : la probabilité de refixer un mot est moins importante lorsque le regard est au centre que lorsqu’il atterrit aux extrémités du mot.

(b) Phénomène I-OVP observé sur les durées de fixations individuelles : les durées des fixations sont plus longues lorsque le regard fixe le centre des mots.

2-4-2-2 – Origine des phénomènes I-OVP et refixation-OVP

Dans certaines des théories présentées précédemment, l'effet OVP pour la refixation est expliqué en termes de traitement lexical (McConkie et al., 1989; Engbert et al., 2005) ; les refixations seraient moins fréquentes lorsque le regard fixe initialement le centre des mots car la probabilité de l’identifier en une seule fixation est plus importante. Mais certains résultats vont à l’encontre d’une telle interprétation en termes de contrôle cognitif direct. Tout d’abord, il a été montré que ce phénomène est relativement indépendant de la fréquence des mots (O’Regan & Lévy-Schoen, 1987; Vitu et al., 2001; Nuthmann et al., 2007) et qu’il s’observe aussi dans des tâches n’impliquant aucun facteur de haut niveau (caractères aléatoires, Vitu et al., 2007 ou lecture de ‘z’, Vitu & O’Regan, 1995; Nuthmann et al., 2007) ce qui va à l’encontre d’un rôle prédominant des facteurs lexicaux. De plus, une telle interprétation ne convient pas pour l'effet I-OVP qui va de paire avec l'effet OVP pour la refixation, et s’observe aussi lors de l'exploration de stimuli non linguistiques et sans signification. En effet, si le phénomène I-OVP était déterminé en temps réel par le traitement du mot fixé, on devrait observer, comme dans le cas de l’effet de la fréquence des mots (voir Section 2-4-2-1), des

fixations plus courtes lorsque le traitement est plus facile, soit des fixations plus courtes lorsque le regard fixe le centre des mots. Or, ce n'est pas ce qui a été rapporté ; au contraire, les fixations sont systématiquement plus longues au centre des mots. Plusieurs hypothèses alternatives, à dominante visuomotrice, ont donc été avancées pour expliquer ces deux phénomènes (pour une revue voir [Vitu et al., 2007](#)).

Nuthmann et al. ([2005](#), [2007](#), voir aussi [Engbert et al., 2005](#)) ont proposé une hypothèse explicative en termes **d'erreurs de visée** : une petite partie des saccades atterrissant au début ou à la fin des mots seraient en réalité des saccades dont l'amplitude a été mal programmée et qui ne sont pas parvenues à entraîner le regard vers le centre d'un mot (environ 10% des cas). Ces erreurs de visée seraient rapidement compensées par une nouvelle saccade dirigée le plus souvent vers la position initialement prévue, ce qui expliquerait la diminution des durées moyennes de fixation (effet I-OVP) et la plus grande probabilité de refixation (effet refixation-OVP) aux extrémités des mots. Cette hypothèse est cependant contredite par les résultats de Vitu et al ([2007](#)) qui montrent que l'effet I-OVP est conservé, et même renforcé, lorsque la position du regard dans le mot est déterminée par l'expérimentateur (au moyen d'un paradigme OVP classique) et que, par conséquent, les erreurs de visée sont supprimées.

Vitu et al. ([2001](#); [2007](#)) ont proposé une hypothèse reposant sur des **stratégies d'économie perceptive**. Selon cette hypothèse, un processus automatique mis en place au fil de l'apprentissage de la lecture, tendrait à inhiber le déclenchement des saccades précoces lorsque le regard est placé au centre de l'objet à identifier et que la quantité d'information extraite est plus importante, entraînant ainsi une augmentation de la durée moyenne des fixations au centre des mots. Cette inhibition reposerait principalement sur des informations visuelles de bas niveau (longueur des mots, espaces inter-mots), ce qui expliquerait pourquoi l'effet I-OVP s'observe aussi lorsque le stimulus est une chaîne de caractères aléatoires. Les auteurs ajoutent ensuite que l'origine de l'effet OVP pour la refixation reste encore à déterminer. Ce phénomène serait soit déterminé par le même processus visuo-moteur (lorsque le regard fixe le centre, le système prévoit à la fois une fixation plus longue et une saccade plus longue), soit une conséquence de l'effet I-OVP inhérente au système oculomoteur (les fixations brèves sont plus souvent suivies par une saccade de faible amplitude que les fixations longues).

2-4-3 – Les déterminants du comportement oculomoteur inter-mots

Le comportement oculomoteur inter-mots réfère aux saccades entraînant le regard d'un mot vers un autre ; il comprend la position d'atterrissage du regard au sein des mots ainsi que la probabilité de sauter un mot. Lors de la lecture d'un texte, les saccades, d'une amplitude moyenne de 6 à 9 caractères entraînent le regard à fixer deux mots sur trois, et par conséquent à sauter les autres mots. L'étude des distributions des positions initiales de fixation au sein des mots a permis de mettre en évidence une préférence à atterrir au centre ou légèrement à gauche du centre des mots. Ce phénomène robuste, connu sous le nom de **phénomène de position préférée du regard** (ou **PVP** pour « *Preferred Viewing Position* » en anglais, [Rayner, 1979](#)), se présente sous la forme d'une gaussienne dont le maximum se situe au centre ou légèrement à gauche du centre du mot dans les langues lues de la gauche vers la droite.

2-4-3-1 – Facteurs influençant le comportement inter-mots

Ces mesures sont relativement invariantes selon la langue, le niveau de lecture ou la tâche à effectuer (lecture de texte, recherche visuelle dans une chaîne de caractères; pour une revue voir [Vitu, 2011](#)). Elles ne varient aussi que très peu en fonction des facteurs lexicaux et sémantiques ; l'amplitude des saccades et la probabilité de sauter un mot sont légèrement plus importantes lorsque la fréquence et la prédictibilité du mot augmentent, mais la forme de l'effet PVP n'est globalement pas modifiée ([Lavigne et al., 2000](#); [Rayner et al., 2001](#), pour une revue cf. [Vitu, 2011](#)) et les effets sur la probabilité de saut de mots sont très faibles et instables (pour une revue voir [Brybaert & Vitu, 1998](#); [Brybaert et al., 2005](#)). Le comportement oculomoteur inter-mots est en revanche plus fortement influencé par les facteurs visuels dits « bas niveau », notamment la longueur des mots, la position du mot sur la ligne de texte et la position de départ de la saccade par rapport au début du mot.

Les distributions des positions d'atterrissage sont premièrement influencées par la **longueur des mots** : à mesure que la longueur des mots augmente, elles se décalent vers une position à gauche du centre des mots, voire leur début ([Rayner, 1979](#); [Vitu et al., 2001](#)). Par conséquent, la probabilité de sauter les mots est plus faible pour les mots longs que pour les mots courts ([Rayner & McConkie, 1976](#)). L'effet de la **position du mot sur la ligne de texte** se traduit par un biais en direction du centre de la ligne. Lorsque le mot est proche du début de la ligne de texte, le centre ou la fin des mots sont plus souvent favorisés et la probabilité de

saut de mots est plus importante que lorsque le mot est situé en fin de ligne ([Vitu & McConkie, 2003](#) voir aussi [Vitu et al., 2004b](#)). Enfin, l'**effet du site de départ** (ou « *Launch Site Effect* » en anglais) est l'effet de la distance entre la position de la fixation précédente et le début du mot. Puisque le regard a tendance à atterrir vers le centre des mots, l'amplitude des saccades augmente avec l'éloignement du mot cible, mais pas de manière égale. L'effet du site de départ montre que les saccades partant d'un point de départ éloigné ont tendance à « sous-viser » le centre des mots et qu'inversement, plus le point de départ de la saccade est proche du début du mot, plus le regard a tendance à atterrir vers la fin du mot, voire à le sauter ([McConkie et al., 1988](#), pour revue cf. [Vitu, 2007](#)). Les distributions des positions initiales de fixation dans les mots vont donc se décaler vers la fin du mot de manière relativement constante à mesure que le point de départ se rapproche du début du mot (cf. Figure 2. 14a). Ainsi, selon les résultats de McConkie et al. ([1988](#)), lorsque l'on représente la moyenne de ces distributions en fonction de la position de départ de la saccade (par rapport au centre du mot), on obtient une droite dont la pente est en moyenne de 0,5 lettres et qui varie légèrement en fonction de la longueur des mots (cf. Figure 2.14b). De plus les auteurs ont montré que l'écart-type des distributions individuelles augmentait avec l'éloignement du site de départ. Ils ont attribué cet effet à des erreurs de visée oculomotrices aléatoires dont la variabilité augmente avec l'amplitude de la saccade. Un autre résultat important, rapporté par McConkie et al. ([1988](#)), est qu'il est possible d'approcher la courbe PVP en sommant les distributions correspondant à chaque condition de point de départ, ce qui suggère que l'effet PVP ne serait pas un phénomène fondamental mais plutôt la résultante de l'effet du site de départ.

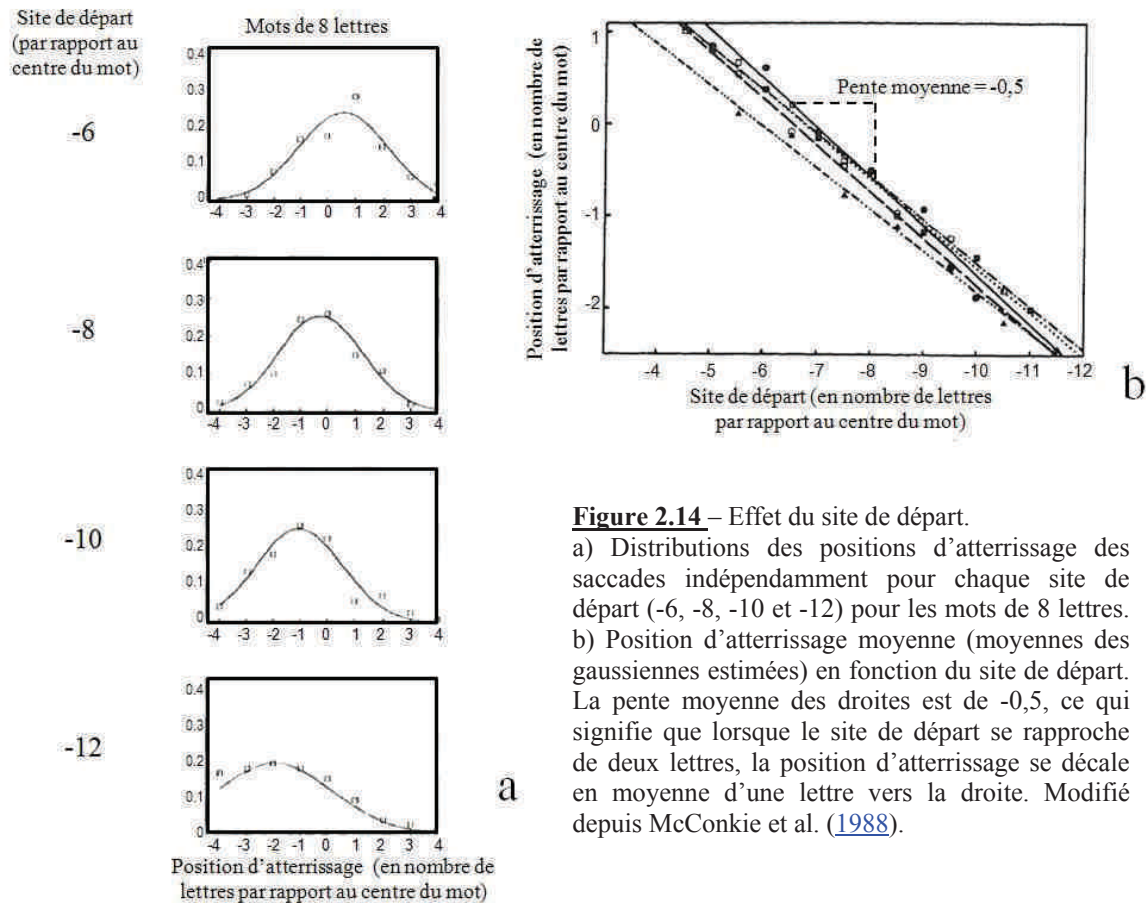


Figure 2.14 – Effet du site de départ.

a) Distributions des positions d'atterrissage des saccades indépendamment pour chaque site de départ (-6, -8, -10 et -12) pour les mots de 8 lettres. b) Position d'atterrissage moyenne (moyennes des gaussiennes estimées) en fonction du site de départ. La pente moyenne des droites est de -0,5, ce qui signifie que lorsque le site de départ se rapproche de deux lettres, la position d'atterrissage se décale en moyenne d'une lettre vers la droite. Modifié depuis McConkie et al. (1988).

2-4-3-2 – Hypothèses explicatives du comportement inter-mots

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer le phénomène PVP. Les deux principaux points sur lesquels elles diffèrent sont (1) pourquoi le regard atterrit-il plus fréquemment au centre des mots, et (2) à quoi est due la dispersion des positions d'atterrissage.

Comme nous l'avons expliqué lorsque nous avons présenté les modèles du guidage oculaire (section 2-4-1-2), l'hypothèse la plus largement admise concernant le comportement vers l'avant est que le regard sélectionne comme cible le centre d'un mot situé en parafovée (pour une revue voir Vitu, 2011). Selon le type de modèle (cognitif ou visuomoteur), la sélection du mot cible repose soit sur le traitement des mots en parafovée, soit sur des processus visuo-moteurs (e.g. viser les mots longs uniquement; O'Regan, 1990). Néanmoins, quel que soit le type de modèle, la visée du centre d'un mot ou blob visuel résulte d'une stratégie d'optimisation du traitement des mots, mise en place au cours de l'apprentissage de

la lecture ([Just & Carpenter, 1980](#); [Morrison, 1984](#); [O'Regan & Lévy-Schoen, 1987](#); [McConkie et al., 1988](#); [Reichle et al., 2003](#); [Engbert et al., 2005](#); [McDonald et al., 2005](#)). Ainsi, le regard atterrirait le plus souvent au centre des mots car ce serait la cible qui a été sélectionnée par le système oculomoteur. Mais plusieurs arguments émis par Vitu ([2008](#)) vont à l'encontre de l'hypothèse selon laquelle le regard vise le centre de mots prédéfinis comme cibles (voir aussi [Yang & McConkie, 2004](#)). Tout d'abord, les effets très réduits de la fréquence et de la prédictibilité des mots situés en parafovéa sur le comportement oculomoteur inter-mots (voir [Brybaert & Vitu, 1998](#); [Brybaert et al., 2005](#)) affaiblissent l'hypothèse selon laquelle un mot est sélectionné comme cible sur la base du prétraitement parafovéal. De plus, il a même été montré que la tendance à sauter les mots courts et/ou proches ainsi que l'effet PVP étaient présents lorsque les participants déplaçaient leur regard le long de lignes de texte où toutes les lettres avaient été remplacées par des 'z' ([Vitu & O'Regan, 1995](#); [Nuthmann et al., 2007](#)). Enfin, les résultats de Vitu et al. ([2006](#)) montrent que le temps nécessaire à la préparation d'une saccade précise, atterrissant sur une lettre cible présentée toujours au centre d'une chaîne de caractères homogènes (ex: "xxxkxxx"), est supérieur au temps de fixation moyen lors de la lecture (i.e. environ 500-600 ms) (voir aussi [Coëffé & O'Regan, 1987](#); [Jacobs, 1987](#)). Vitu ([2008](#)) explique donc qu'il est peu probable que le système tente de viser exactement le centre des mots lors de la lecture alors qu'il est, le plus souvent, incapable d'effectuer des saccades précises dans de telles conditions.

Concernant la dispersion des positions d'atterrissage des saccades, elle est, la plupart du temps, attribuée à des erreurs de visée qui seraient une combinaison d'erreurs aléatoires, inhérentes au système oculomoteur (ou bruit), et d'erreurs systématiques (dites « de gamme ») à effectuer des saccades d'amplitude constante (d'environ 7 espaces caractères dans la lecture de l'anglais). Selon McConkie et al ([1988](#)), de la même manière que pour l'effet de gamme observé dans des tâches de visée de cible ([Kapoula, 1985](#)), les saccades réalisées vers des mots/stimuli proches du regard auraient tendance à « sur-viser » le centre des mots et celles réalisées vers des mots/stimuli éloignés auraient tendance à le « sous-viser ». Cet effet de gamme présent lors de la lecture expliquerait l'effet du site de départ sur la position d'atterrissage des saccades : plus le point de départ est éloigné du centre du mot, plus la saccade atterrit près du début du mot. Il expliquerait aussi la dispersion des courbes PVP qui représentent les points d'atterrissage de toutes les saccades, tous sites de départ confondus. Cependant, si les erreurs de visée dans la lecture peuvent être dues aux propriétés du système oculomoteur, il est en revanche moins probable qu'elles soient le résultat d'un effet de

gamme. En effet, Vitu (1991a) a examiné la distribution des positions de fixation dans des mots isolés en fonction de leur excentricité, manipulée au sein d'un bloc, et n'a obtenu aucun effet, suggérant donc l'absence d'un effet de gamme.

Au vu de ces résultats, Vitu (2008) a donc proposé une hypothèse alternative au comportement oculomoteur inter-mots reposant essentiellement sur les propriétés visuelles des stimuli (voir aussi Vitu & Blanes, 2009). Selon cette hypothèse, la tendance à atterrir vers le centre des mots ainsi que la dispersion des positions d'atterrissage autour de cette position centrale et les sauts de mots seraient dus à un effet global. L'effet global, que nous avons décrit au Chapitre 1 (cf. section 1-2-3-3), montre que, dans une tâche de visée de cible, les saccades sont moins précises lorsque la cible est présentée au même moment qu'un ou plusieurs autres stimuli (ou distracteurs) et que le regard a tendance à atterrir à une position correspondant au centre de gravité de la scène visuelle (Findlay, 1982). Dans le cas de la lecture, le regard n'aurait donc pas pour objectif de viser le centre de mots préalablement sélectionnés comme cibles, mais effectuerait une saccade d'amplitude moyenne ou encore une saccade dont l'amplitude est déterminée par l'emplacement du centre de gravité de l'ensemble des lettres à droite du point fixé, pondéré par la magnification corticale. Cette saccade amènerait les yeux à une position variable dans les mots selon la configuration visuelle formée par les mots et l'emplacement des espaces blancs. L'effet du site de départ serait donc seulement le résultat de cet effet global : lorsque la saccade part d'une position éloignée, il y a plus de lettres à gauche qu'à droite du centre du mot suivant et le regard a plus tendance à atterrir vers le début du mot. Inversement, lorsque le site de départ est proche du centre du mot suivant, le regard est attiré par les lettres situées à droite du centre et la saccade est attirée vers la fin du mot, voire le mot suivant (entraînant donc un saut de mot). En accord avec cette hypothèse, Vitu et al. (2006) ont mis en évidence l'existence d'un effet global (ainsi que d'un effet des distracteurs éloignés, Walker et al., 1997) lors d'une tâche de reconnaissance de lettres dans des chaînes de caractères. Les résultats de l'expérience de Vitu et Blanes (2009) sont aussi en accord avec cette hypothèse. Ils ont tout d'abord montré que la position d'atterrissage dans les mots dépendait de la condition d'affichage du mot : lorsqu'un mot était présenté seul, les saccades atterrirent moins loin que lorsque le mot apparaissait en tête d'un groupe de mots (voir aussi Vitu, 1991b), mais plus loin que lorsque des lettres étaient insérées en avant du mot, dans la région fovéale. D'autre part, l'effet du site de départ montrait des variations importantes en fonction du contexte visuel ; la pente des courbes représentant la position initiale de fixation en fonction du site de départ était minimale dans la condition où le

mot test était présenté seul, puis augmentait en présence de stimulation périphérique ou fovéale, pour être maximale lorsque le mot était entouré d'autres mots/chaînes de caractères.

En résumé, contrairement à l'effet I-OVP qui serait le reflet de stratégies visuomotrices établies à partir de l'expérience perceptive (i.e. le regard fixe plus longtemps au centre des mots car c'est, le plus souvent, la position optimale pour l'identifier), les phénomènes observés sur l'amplitude des saccades seraient plutôt les conséquences de processus visumoteurs de bas niveau. Le regard atterrirait plus fréquemment vers le centre des mots car cette position correspond au « centre de gravité » de la configuration visuelle périphérique. Néanmoins, comme pour l'hypothèse d'économie perceptive, les facteurs cognitifs (fréquence lexicale, informativité ou prédictibilité des mots), même s'ils ne sont pas, a priori, à l'origine des effets observés, pourraient toutefois intervenir et moduler légèrement la position initiale de fixation et la probabilité de saut de mot.

CHAPITRE 3 : BASSE VISION ET LECTURE EN VISION PERIPHERIQUE

Ce dernier chapitre d'introduction a pour but de présenter dans un premier temps, et de façon succincte, les principaux types de déficiences visuelles et plus particulièrement la Dégénérescence Maculaire Liée à l'Age (ou DMLA). Nous détaillerons ensuite les adaptations neuro-anatomiques et stratégiques qui peuvent être développées, puis nous nous concentrerons sur les difficultés rencontrées par les patients lors de la lecture ainsi que les facteurs qui sont supposés sous-tendre ces difficultés.

3-1 – PATHOLOGIES LIEES A LA PERTE DE LA VISION CENTRALE

3-1-1 – La basse vision

Le terme de basse vision, employé surtout dans le milieu médical, caractérise les patients qui ont une déficience visuelle importante, même après un traitement médical ou une correction optique standard. Devant la nécessité de critères objectifs pour les études épidémiologiques, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a classé les déficiences visuelles en cinq catégories selon l'acuité et la taille du champ visuel (cf. Tableau 3.1). La basse vision regroupe les catégories 1 et 2, qui concernent les patients ayant une acuité visuelle corrigée comprise entre 3/60 et 6/18 ou un champ visuel inférieur à 20° mais n'étant pas atteints de cécité absolue ([Resnikoff et al., 2004](#)). En 2002, les statistiques de l'OMS évaluèrent à 161 millions le nombre de personnes atteintes de déficience visuelle, dont 124 millions atteintes de basse vision, soit 2% de la population mondiale. Cette prévalence n'est pas uniforme au sein de la population mais varie notamment selon l'âge et le sexe. La cécité concerne majoritairement les personnes de plus de 50 ans (82% des personnes aveugles), et les femmes, qui ont 1,5 à 2,2 fois plus de risque de déficience visuelle que les hommes.

Cette classification peut s'avérer discutable car elle ne prend pas forcément en compte les capacités de lecture des patients. En effet, si, par exemple, la zone centrale de la rétine est préservée, une réduction importante de l'acuité ou de la taille du champ visuel ne s'accompagnera pas forcément d'une baisse drastique des performances de lecture. La définition de la basse vision proposée par Legge et al. ([1985b](#)) semble plus appropriée. Ils la

définissent comme un handicap visuel qui résulte en une incapacité à lire un journal à une distance de lecture standard (40 cm), et ce malgré l'utilisation d'une correction optique classique.

	Acuité visuelle	Champ Visuel	Niveau de l'atteinte
Catégorie 0	supérieure à 6/18	supérieur à 20°	Déficiência légère ou nulle
Catégorie 1	De 6/18 à 20/200	De 10° à 20°	Basse vision Déficiência modérée
Catégorie 2	De 20/200 à 20/400		Basse vision Déficiência sévère
Catégorie 3	De 20/400 à 20/1200	Moins de 10°	Cécité
Catégorie 4	Inférieure à 20/1200 mais perception de la lumière conservée		
Catégorie 5	Aucune perception de la lumière		
Catégorie 9	Indéterminé ou non-spécifié		

Tableau 3.1- Classification des déficiences visuelles selon l'OMS.

Les déficiences visuelles sont classées selon l'acuité visuelle et la taille du champ visuel. La basse vision regroupe les catégories 1 et 2. Modifié depuis <http://www.who.int>.

Les pathologies de la rétine, ou rétinopathies, à l'origine de la basse vision peuvent engendrer trois types de dommages fonctionnels :

- une perte de la vision périphérique entraînant une vision dite « tubulaire ». C'est le cas notamment lors d'une rétinite pigmentaire.
- une vision floue et une diminution des contrastes, comme dans le cas de la cataracte.
- une perte de la vision centrale ou maculaire, comme dans le cas de la DMLA ou de la maladie de Stargardt (forme juvénile de dégénérescence maculaire). Ces atteintes sont caractérisées par une baisse de l'acuité visuelle et par l'apparition d'une tache aveugle dans le champ visuel, le plus souvent dans la zone centrale. Ceci gêne la perception visuelle, en particulier pour la reconnaissance des visages ou la lecture, mais n'entraîne pas une cécité complète car la partie périphérique du champ visuel est préservée.

3-1-2 – La Dégénérescence Maculaire liée à l'Age (DMLA)

La DMLA est une maladie dégénérative et évolutive entraînant des lésions de la rétine centrale et apparaissant généralement après 50 ans. Selon l'OMS, la DMLA est la troisième cause mondiale de déficience visuelle (première cause dans les pays industrialisés) et représente 8,7% des causes de cécité. L'origine exacte de cette maladie est encore inconnue, mais on sait que le principal facteur de risque est l'âge, et que d'autres facteurs tels que le tabagisme, l'influence génétique ou le degré de pigmentation (plus de risque en cas d'iris clair) peuvent aussi entrer en jeu.

Dans le cas de la DMLA, les lésions rétinienne sont dues à une mauvaise élimination des déchets issus du métabolisme des photorécepteurs par l'épithélium pigmentaire. Ceci va, dans un premier temps, provoquer une altération de l'épithélium ainsi que la formation de dépôts (ou « drusens ») entre l'épithélium et la choroïde, principalement au niveau de la macula ([de Jong, 2006](#); cf. Figure 3.1A). Ce stade précoce de la maladie, appelé « Maculopathie Liée à l'Age », n'a que très peu d'effet sur le plan visuel, mais il peut évoluer en l'une des deux formes tardives, beaucoup plus invalidantes : la DMLA atrophique (ou « sèche ») ou la DMLA exsudative (ou « humide »).

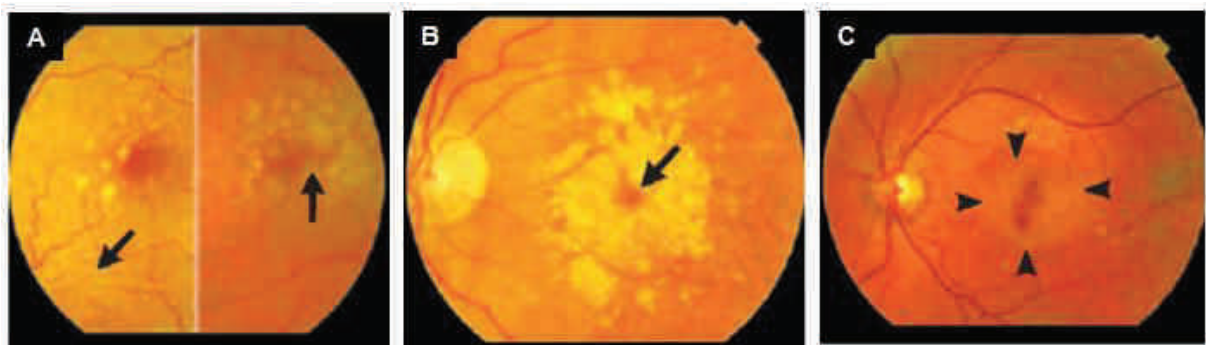


Figure 3.1- Fondus d'œil pour les différentes formes de DMLA.

(A) Deux rétines présentant une DMLA précoce, caractérisée par des drusens (points clairs)

(B) DMLA sèche présentant une atteinte annulaire (zone plus claire) et une partie centrale préservée (flèche).

(C) DMLA humide avec décollement de l'épithélium pigmentaire (flèches). *Modifié depuis de Jong (2006).*

3-1-2-1 – La DMLA atrophique (ou sèche)

Une DMLA est de forme atrophique lorsque la présence des drusens entraîne la disparition progressive et définitive des photorécepteurs ainsi que la formation de plages d'atrophie au niveau de la macula. Généralement, les zones d'atrophie se développent d'abord dans la zone péri-fovéale (cf. Figure 3.1B) puis recouvrent progressivement la totalité de la rétine centrale. Dans les premiers stades de la maladie, les patients vont donc pouvoir utiliser cette zone centrale épargnée pour les tâches nécessitant une bonne acuité visuelle, mais lorsque l'atrophie aura atteint la fovéa, ils devront utiliser leur vision périphérique en permanence. Cette forme de DMLA est la plus courante (80% des cas) mais n'est pas la plus invalidante ; en effet sa progression lente et sa localisation péri-fovéale font qu'elle n'est responsable que de 20% des cas de cécité dus à la DMLA ([Ferris et al., 1984](#)). Il n'existe cependant, à ce jour, aucun traitement thérapeutique capable de la ralentir ou de la résorber.

3-1-2-2 – La DMLA exsudative (ou humide)

La forme humide de la DMLA est due à la prolifération rapide et anarchique de vaisseaux sanguins à partir de la choroïde. Cette néovascularisation est accompagnée d'hémorragies qui vont provoquer un décollement de l'épithélium pigmentaire ainsi qu'une destruction des cellules photoréceptrices en particulier au niveau de la macula (cf. Figure 3.1C). Ces dommages sont irréversibles mais il existe cependant des traitements capables de ralentir la prolifération des vaisseaux sanguins. Les deux moyens les plus utilisés sont la thérapie photodynamique et l'administration de médicaments « anti-VEGF ».

La thérapie photodynamique est une méthode qui est aussi utilisée pour le traitement des cancers. Elle consiste à injecter en intraveineuse un produit qui va se fixer aux cellules en division, donc préférentiellement aux cellules des néo-vaisseaux choroïdiens qui se divisent plus fréquemment. Les zones de la rétine atteintes sont ensuite illuminées avec un laser qui va détruire spécifiquement les cellules fixées au produit photo-sensibilisant. Cette méthode est transitoire ; après un ou deux ans de traitement, les résultats ne montrent plus d'amélioration anatomique ou fonctionnelle pour le patient.

Les « anti-VEGF » (VEGF pour *Vascular Endothelial Growth Factor*) sont des médicaments dits « anti-angiogéniques », qui sont injectés directement dans le corps vitré de l'œil atteint. Ils ont pour action d'inhiber les facteurs de croissance responsables de la prolifération des néovaisseaux. Malgré des améliorations constatées sur l'acuité visuelle des

patients ([Abraham et al., 2010](#)), cette méthode est, elle aussi, transitoire car après traitement, la néovascularisation peut réapparaître.

3-1-2-3 – Les scotomes

Quelle que soit la forme de DMLA, la maladie se manifeste, dans un premier temps, par des symptômes assez discrets tels qu'une baisse de la sensibilité aux contrastes, aux couleurs, une sensation de déformation des lignes droites ainsi qu'une baisse de l'acuité visuelle. Elle se caractérise ensuite par l'apparition d'une tache dans le champ visuel appelée « scotome ». Lorsque l'atteinte touche la macula, ce qui est généralement le cas dans la DMLA, le scotome apparaît au centre du champ visuel : on parle alors de **scotome maculaire**. Selon la partie de la rétine endommagée, les scotomes peuvent être en forme de fer à cheval, d'anneau ou de disque, et présenter des îlots au niveau desquels la vision est plus ou moins préservée (cf. Figure 3.2). A un stade avancé de la maladie, les patients présentent, la plupart du temps, des scotomes en forme de cercle ou d'ellipse horizontale d'un diamètre moyen de l'ordre de 10-20° d'angle visuel ([Schuchard et al., 1999](#)), avec une partie centrale sans aucune perception lumineuse (scotome absolu) et une partie périphérique où la perception est floue et/ou déformée (scotome relatif).

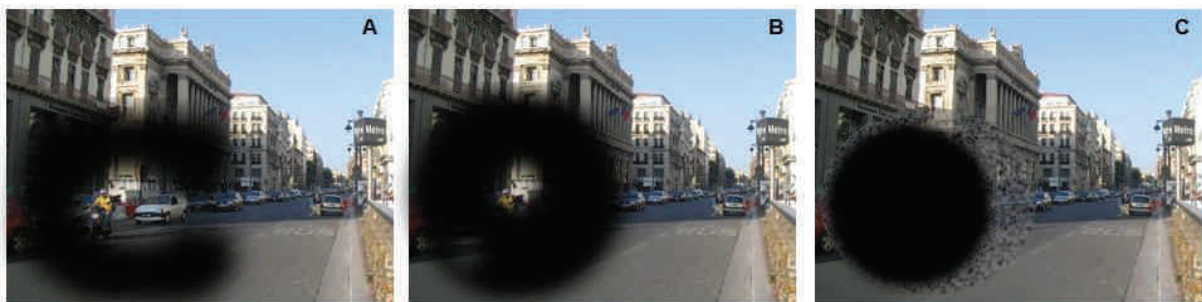


Figure 3.2- Les différentes formes de scotomes

Généralement, un scotome apparaît d'abord sous la forme d'un fer à cheval (A) puis évolue vers un disque ou une ellipse ayant des îlots de vision préservée (B) ou non (C). Le scotome présenté dans l'exemple C possède une partie absolue au centre, et une zone périphérique relative où la vision est floue mais où la perception lumineuse est préservée.

La taille et la position d'une atteinte rétinienne ainsi que du scotome qui en résulte peuvent être évaluées lors d'un examen ophtalmique. Les appareils de mesures les plus utilisés sont le scanner laser à balayage confocal (ou SLO pour *Scanning Laser Ophthalmoscope*, [Webb et al., 1987](#)) et plus récemment, le MP-1 (*Micro Perimeter 1*, Nidek Technologies, Padova, Italy). Ces deux outils permettent d'obtenir une image du fond d'œil grâce à un laser (SLO) ou une lumière infrarouge (MP-1) et d'afficher des stimuli lumineux sur une zone précise de la rétine. Lors de l'examen fonctionnel, le patient a pour consigne de fixer une croix affichée en point fixe du champ visuel en utilisant une zone préservée de sa rétine. Il doit ensuite signaler s'il voit ou non les stimuli lumineux qui sont projetés sur sa rétine. En faisant varier la position et l'intensité des stimuli, l'expérimentateur va pouvoir déterminer la taille et la position du scotome, détecter la présence d'îlots de vision préservée et distinguer les parties absolues et relatives du scotome. En superposant l'image anatomique (aussi appelée « fond d'œil ») aux résultats de l'examen fonctionnel, on obtient des images permettant de visualiser de façon simple et rapide l'atteinte du patient (cf. Figure 3.3A). Le SLO et le MP-1 permettent aussi de mesurer la stabilité de fixation des patients, c'est-à-dire leur capacité à maintenir leur regard dans une zone proche de la croix de fixation ([Crossland et al., 2004a](#), cf. Figure 3.3B et Section 3-3-2). Le SLO est aussi utilisé en recherche fondamentale pour afficher des stimuli directement sur la rétine dans le cadre, par exemple, d'une tâche de reconnaissance de lettres ou de mots ([Timberlake et al., 1987](#)).

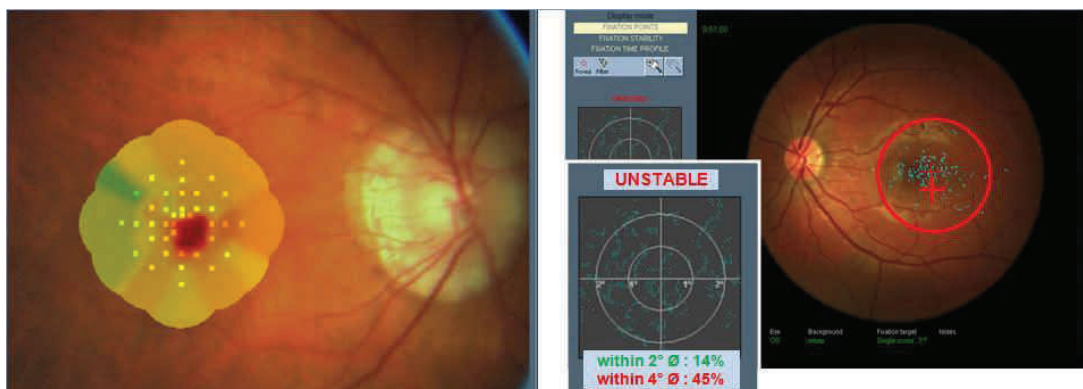


Figure 3.3- Examens réalisés avec un MP-1.

A gauche : Mesure de la taille d'un scotome (périmétrie). Les couleurs codent l'intensité lumineuse nécessaire pour que le stimulus soit perçu par le patient, donc le niveau de perception visuelle. Rouge foncé = aucune perception visuelle (scotome absolu), rouge à orange = perception limitée (scotome relatif), vert = perception normale.

A droite : Mesure de la stabilité de fixation. La fixation est considérée comme instable si, comme dans ce cas, moins de 75% des points sont dans les 4° autour de la croix de fixation.

Modifié depuis <http://www.nidektechnologies.it/>

3-2 – ADAPTATIONS ANATOMIQUES ET FONCTIONNELLES A LA PRESENCE D’UN SCOTOME

3-2-1 – Adaptations neuro-anatomiques du système visuel

Il arrive souvent que les déficits visuels liés à la formation d’un scotome ne soient pas immédiatement perçus par les patients. Ceci est dû d’une part au fait que la DMLA survient généralement de manière asymétrique et que, lorsque l’atteinte est monoculaire, le déficit d’un œil va pouvoir être compensé par l’autre. D’autre part, la disparition des photorécepteurs va entraîner une réorganisation neuro-anatomique de l’ensemble du système visuel qui va permettre de pallier le déficit, du moins dans les premiers temps de la maladie.

3-2-1-1 – Observations neuro-anatomiques

De nombreuses études ont montré que la suppression ou la sur-utilisation d’une modalité sensorielle pouvait modifier l’organisation anatomique du système nerveux. Ce phénomène connu sous le nom de « plasticité neuronale » a été mis en évidence pour tous les types d’information sensorielle ([Frasnelli et al., 2011](#)). Lors d’une lésion de la rétine, la plasticité neuronale se manifeste d’abord par des modifications locales. On assiste dans un premier temps à la déafférentation (destruction des terminaisons synaptiques) et à la dégénérescence des photorécepteurs, puis à la cicatrisation de la zone lésée, et enfin à la migration puis au recâblage des neurones de la rétine (couche intermédiaire et cellules ganglionnaires) ([Jones & Marc, 2005](#); [Sullivan et al., 2007](#)). Des études menées chez l’animal (singe, chat ou modèles génétiques murins) ont montré qu’une lésion rétinienne entraînait aussi une modification de la topographie du cortex visuel primaire (pour une revue voir [Cheung & Legge, 2005](#)). Lorsqu’une partie de la rétine est endommagée, on observe après quelques mois ([Kaas et al., 1990](#)), ou même après quelques heures seulement ([Gilbert & Wiesel, 1992](#)), une diminution de la zone corticale correspondant à la zone lésée et une augmentation de la taille des représentations corticales des zones rétinienne voisines. Des effets similaires ont été observés chez des patients présentant des scotomes centraux grâce à des techniques non invasives comme l’IRM fonctionnelle ; c’est-à-dire une absence de réponse corticale lors de la stimulation de la zone centrale de la rétine, et inversement, une activation de la zone corticale correspondant normalement à la macula lors d’une stimulation de la rétine para-maculaire intacte ([Baker et al., 2005](#); [Baker et al., 2008](#)).

3-2-1-2 – Le phénomène de complétion visuelle

Le phénomène de complétion visuelle, aussi appelé « effet de remplissage perceptif » (ou « *perceptual filling-in* » en anglais), se définit comme une adaptation du système visuel visant à diminuer l'impact d'un trou ou d'une discontinuité dans le champ visuel et à maintenir la cohérence de l'information globale ([Safran & Landis, 1999](#); [Cohen & Legargasson, 2005](#)). Cet effet se manifeste à l'état physiologique au niveau de la tache aveugle que nous possédons tous au niveau du disque optique. En effet, l'absence de photorécepteur à cet endroit de la rétine ne donne pas lieu à un scotome, et ce même dans le cas d'une vision monoculaire, car l'information manquante est « interpolée » à partir des informations provenant des zones environnantes de la rétine. En revanche, un stimulus présenté dans cette partie du champ visuel ne pourra pas être détecté si sa taille est inférieure à celle de la tache aveugle (6° de diamètre environ, [Armaly, 1969](#)). Ce phénomène se retrouve aussi chez les patients atteints de DMLA ([Cohen et al., 2003](#); [Cohen & Legargasson, 2005](#)) et explique pourquoi, dans les premiers temps de la maladie, le scotome n'est pas perçu par les patients. Lorsque l'atteinte devient plus importante, l'absence d'information ne peut plus être compensée et les patients ressentent alors une lacune dans leur champ visuel, mais la taille du scotome ressenti reste souvent inférieure à la taille du scotome réel ([Achard et al., 1995](#); [Cohen et al., 2003](#)). Cohen et al. (2003) ont également montré que le phénomène de complétion visuelle se produisait surtout lorsque l'atteinte rétinienne était binoculaire et qu'elle correspondait à la même zone du champ visuel sur les deux yeux (80% des cas contre 6% seulement pour une atteinte monoculaire). Et généralement, l'effet est présent seulement sur l'œil le moins atteint des deux. Les mécanismes sous-tendant cet effet ne sont pas entièrement connus, mais la majorité des études électrophysiologiques ([De Weerd et al., 1995](#)), psychophysiques ([Crossland & Bex, 2008](#)) et d'imagerie fonctionnelle ([Mendola et al., 2006](#)) vont en faveur d'une origine corticale du phénomène : la complétion visuelle serait due à une modification de l'activité des neurones du cortex visuel, en particulier les aires V3, V1 et V2.

3-2-2 – Adaptation stratégique : mise en place d’une PRL

En plus des adaptations neuro-anatomiques que nous avons décrites, les patients atteints d’une dégénérescence maculaire vont mettre en place des adaptations stratégiques afin de pouvoir pallier leur déficit et continuer à effectuer les tâches du quotidien. Ces adaptations stratégiques s’établissent généralement de façon spontanée mais elles peuvent aussi être aidées et guidées par une rééducation orthoptique.

3-2-2-1 – PRL : définition et mise en place

Lorsque nous voulons voir un objet, nous déplaçons spontanément notre regard en direction de cet objet et utilisons la partie centrale de notre rétine, la fovéa, pour l’identifier. Cette action, si naturelle et automatique pour un sujet sain, devient impossible pour une personne atteinte de DMLA, car chaque fois qu’elle effectue une saccade en direction d’une cible, sa vision centrale est gênée par la présence du scotome. Elle va donc devoir utiliser une zone excentrée de sa rétine pour pouvoir fixer et identifier les objets. On appelle « zone préférentielle de fixation » (ou « *Preferred Retinal Locus*, PRL » en anglais), une zone de la rétine utilisée à la place de la fovéa pour la fixation ou toute autre tâche visuelle ([Cummings et al., 1985](#); [Schuchard & Fletcher, 1994](#); [Cheung & Legge, 2005](#)).

La PRL se développe de façon spontanée ([Von Noorden & Mackensen, 1962](#); [Cummings et al., 1985](#)) chez une grande majorité des patients présentant une atteinte binoculaire. Selon Schuchard & Fletcher ([1994](#)), plus de 80% des patients atteints d’une dégénérescence maculaire sur les 2 yeux ont une PRL établie, et, dans une expérience menée par Crossland et al. ([2005a](#)), la totalité des 25 patients testés a développé une PRL dans les 6 mois suivant le diagnostic de la maladie. La mise en place d’une PRL peut s’accompagner d’une réorganisation du système oculomoteur. En effet, si la majorité des patients déclarent positionner volontairement leur scotome à côté de la cible puis porter leur attention dans la zone correspondant à leur PRL, certains ont la sensation de viser directement la cible, comme ils le feraient avec leur fovéa ([Von Noorden & Mackensen, 1962](#); [White & Bedell, 1990](#)). Dans ce cas, le système oculomoteur a défini la PRL comme le nouveau point de référence pour la programmation des saccades et corrige spontanément l’amplitude et la trajectoire des saccades de fovéation afin de placer la cible à fixer directement sur la PRL et non sur la fovéa endommagée. Cependant, ce phénomène ne se produit que pour certains patients (30% des sujets testés dans l’expérience de [White & Bedell, 1990](#), 64% chez [Crossland et al., 2005a](#)) et

surtout chez ceux présentant une atteinte depuis plusieurs années. Baker et al. (2005) ont aussi montré que cette adaptation pouvait se voir au niveau du cortex visuel primaire chez des patients atteints d'une forme juvénile de dégénérescence maculaire. Chez ces patients, porteurs d'un scotome maculaire depuis plus de 60 ans, une stimulation des régions rétiniennes voisines du scotome entraînaient une activation de la zone corticale correspondant normalement à la fovéa. Cette adaptation corticale est cependant très rare et n'a pas été retrouvée dans les études sur les patients DMLA (Sunness et al., 2004). Dans tous les cas, même si les patients sont capables d'utiliser une zone périphérique de leur rétine pour remplacer leur fovéa endommagée, leurs performances oculomotrices (latence et précision des saccades, stabilité de fixation) restent inférieures à celles des sujets sains (Whittaker Stephen G. et al., 1991; Shima et al., 2010).

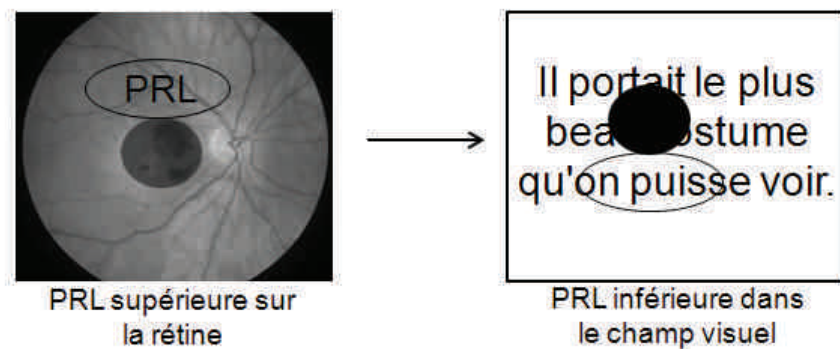


Figure 3.4- Position de la PRL sur la rétine et dans le champ visuel.

Compte tenu de l'inversion de l'image sur la rétine, la position de la PRL varie selon le référentiel choisi : une PRL située au-dessus du scotome sur la rétine se retrouve en dessous du scotome dans le champ visuel. Pour des raisons de simplicité, nous choisirons comme référentiel le champ visuel et parlerons donc, dans ce cas là, de PRL inférieure.

3-2-2-2 – Position de la PRL

La position de la PRL se définit généralement par rapport au scotome. Elle peut être horizontale (à gauche ou à droite du scotome) ou verticale (au-dessus ou en-dessous du scotome). Même si la PRL est par définition une zone de la rétine (« Preferred **R**etinal locus »), on a plutôt tendance à définir sa position dans le référentiel du champ visuel (Guez et al., 1993; Sunness et al., 1996; Cheung & Legge, 2005). Ainsi, un patient utilisant la partie supérieure de sa rétine pour identifier un objet, utilise en réalité la partie inférieure de son champ visuel. Pour des raisons de simplicité, on parlera alors de PRL inférieure (cf. Figure

3.4). La position de la PRL peut être déterminée de façon précise grâce à un examen de fixation utilisant un MP-1 ou un SLO. L'examen consiste à demander au patient de fixer une croix qui lui est projetée directement sur la rétine pendant une durée de 20 à 30 secondes. L'image obtenue va permettre d'estimer la position ainsi que la taille (stabilité de fixation, cf. [3-3-2](#)) de la zone de la rétine utilisée préférentiellement durant la tâche (PRL). Les études menées sur les patients DMLA montrent qu'ils utilisent préférentiellement une PRL de fixation proche de la limite du scotome ([Sunness et al., 1996](#)), et située à gauche ou en-dessous de celui-ci ([Guez et al., 1993](#); [Fletcher & Schuchard, 1997](#); [Somani & Markowitz, 2004](#)). Dans l'étude menée sur 825 patients par Fletcher & Schuchard ([1997](#)), parmi les 327 patients présentant un scotome absolu, 39% avaient une PRL inférieure et 33,7% une PRL gauche.

3-2-2-3 – Hypothèses sur le choix de la PRL

Le fait de favoriser une PRL inférieure ou gauche ne semble pas dû au hasard. Cela pourrait s'expliquer par la mise en jeu d'une combinaison de facteurs tels que la **topographie du système visuel**, les **performances visuelles** ou la **tâche à effectuer** ([Cheung & Legge, 2005](#)).

Comme nous l'avons expliqué précédemment (cf. [3-2-1-1](#)), la formation d'un scotome maculaire entraîne une réorganisation du système visuel, avec notamment une diminution de la taille de la zone corticale correspondant à la macula au profit des zones corticales voisines. Puisque le cortex visuel primaire est organisé de manière rétinotopique, il est possible que les fonctions auparavant assurées par la macula se retrouvent prises en charge par une zone voisine de la rétine et que, par conséquent, la PRL s'établisse aux environs de la bordure du scotome. Les résultats rapportés par Fletcher & Schuchard ([1997](#)) ainsi que par Sunness et al. ([1996](#)) vont dans le sens de cette hypothèse : parmi les patients DMLA étudiés, une grande majorité (89% et 100% respectivement) avaient une PRL située dans les 2° ou 2,5° bordant le scotome.

Si on considère, dans un deuxième temps, une hypothèse basée sur les performances visuelles, la PRL devrait se développer dans la zone épargnée de la rétine ayant la meilleure acuité visuelle et les meilleures performances attentionnelles. Selon les données connues sur l'acuité visuelle ([Wertheim, 1980](#)), la zone la plus avantageuse serait située sur le méridien horizontal ou dans le champ visuel supérieur, et le plus proche possible de la fovéa. Or, nous

avons vu que les patients avaient plus tendance à favoriser le champ visuel inférieur. De plus, les résultats de Sunness et al. (1996) montrent que les patients, et en particulier les patients Stargardt, n'adoptent pas forcément comme PRL la zone la plus proche de la fovéa. Le choix du champ visuel inférieur pourrait, en revanche, s'expliquer en termes de performances attentionnelles, car certaines études ont montré un avantage du champ visuel inférieur par rapport au champ visuel supérieur dans des tâches de détection d'orientation (He et al., 1996) ou d'identification de lettres (Altpeter et al., 2000) lorsque la position de la cible était connue à l'avance.

Enfin, il a été montré que certains patients pouvaient utiliser différentes PRL selon la tâche à effectuer (fixation ou reconnaissance de mots, Sunness et al., 1996) ou même au sein d'une même tâche, selon par exemple, la taille du stimulus (Guez et al., 1993) ou sa luminance (Lei & Schuchard, 1997). Ceci suggère que le choix de la PRL pourrait aussi être influencé par la fonction pour laquelle elle est utilisée; dans ce cas, le champ visuel inférieur serait favorisé car il s'avère plus adapté à l'exécution des tâches visuelles quotidiennes, telles que des tâches manuelles visuo-guidées ou la locomotion (Turano et al., 2004). Dans le cas particulier de la lecture, plusieurs études sur des sujets sains utilisant un SLO ou un scotome artificiel rapportent de meilleures performances dans le champ visuel inférieur, que ce soit dans des tâches nécessitant (Duret et al., 1999; Frennesson & Nilsson, 2007) ou non (Petre et al., 2000) l'exécution de mouvements oculaires. En revanche, ces résultats n'ont pas été retrouvés dans le cas des patients DMLA. En effet, et de façon surprenante, il n'existe aucune corrélation directe entre la position de la PRL et les performances de lecture des patients atteints de scotome maculaire (Fletcher et al., 1999; Crossland et al., 2005a). Ces observations seront expliquées plus en détails dans la section PRL et lecture (3-3-4).

3-2-2-4 – Aides visuelles et rééducation orthoptique

Il existe plusieurs types d'appareils permettant d'améliorer les capacités visuelles des patients lors des tâches quotidiennes et en particulier lors de la lecture. Ces aides peuvent être des outils simples, comme par exemple une loupe permettant de grossir les caractères ou une lampe permettant un meilleur confort de lecture, ou des outils plus sophistiqués tels que les téléagrandisseurs électroniques équipés de caméra permettant d'afficher sur un écran l'image agrandie d'un objet ou d'un texte. L'utilisation de ces appareils s'accompagne généralement d'un suivi par un médecin orthoptiste qui va aider le patient à choisir une aide visuelle

adaptée et à s'en servir de façon autonome. Le travail de l'orthoptiste consiste aussi à améliorer les capacités oculomotrices des patients (stabilité de fixation, visée de cible) ainsi que leurs performances de lecture. Comme nous l'avons vu précédemment, il n'existe pas de preuve empirique de l'avantage d'une PRL par rapport à une autre, c'est pourquoi l'orthoptiste n'essaie pas d'encourager une stratégie en particulier, mais plutôt d'améliorer l'utilisation de la PRL choisie spontanément par le patient.

Malgré la plasticité du système visuel, les adaptations stratégiques développées par les patients et les aides optiques et orthoptiques qui leur sont proposées, la présence d'un scotome maculaire sur les deux yeux est très invalidante. Elle entraîne des difficultés lors de tâches nécessitant une bonne acuité visuelle telles que la reconnaissance d'objets, d'images ([Peli et al., 1991](#)) ou de visages ([Boucart et al., 2008](#)), mais la difficulté rencontrée lors de la lecture reste cependant la principale source de gêne rapportée par les patients ([Legge et al., 1985b](#); [Hazel et al., 2000](#)).

3-3 – LA LECTURE EN VISION PERIPHERIQUE

Lors de la lecture de texte, les performances sont généralement mesurées à partir de la vitesse de lecture exprimée en mots par minute. En lecture normale et silencieuse, un lecteur normal lit en moyenne à une vitesse de 300 mots/mn ([Carver R. P., 1989](#)). Cette valeur peut être légèrement influencée par les caractéristiques physiques du stimulus comme la taille des caractères ou le contraste, et elle diminue de manière plus importante avec l'âge ([Akutsu et al., 1991](#)). La vitesse de lecture est aussi fortement diminuée chez les personnes porteuses d'un scotome central, et a fortiori dans le cas de la DMLA qui touche préférentiellement les personnes âgées. Legge et al. ([1985b](#)) rapportent une vitesse moyenne de 70 mots/mn chez les patients porteurs d'un scotome recouvrant entièrement la fovéa. Il est donc important de connaître les facteurs visuels et oculomoteurs limitant les performances de lectures chez les personnes atteintes de DMLA afin de savoir dans quelles mesures elles peuvent être améliorées.

3-3-1– Paradigmes d'étude des performances de lecture

La grande variabilité que l'on observe parmi les atteintes des patients DMLA (taille, position du scotome, acuité visuelle, capacités oculomotrices...) rend très difficile la réalisation d'expériences paramétriques précises sur les caractéristiques de la lecture en vision périphérique. C'est pourquoi, la plupart des études utilisent des participants sains, sans atteinte rétinienne, forcés à lire en vision périphérique, pour étudier l'influence des facteurs visuels et oculomoteurs sur les performances de lecture. Pour cela, deux paradigmes principaux sont utilisés.

Le premier est le paradigme **RSVP**, que nous avons décrit auparavant (cf Chapitre 2, 2-2-1), et qui consiste à présenter à des patients ou à des sujets sains, des lettres ou des mots isolés à une position donnée et pendant une durée limitée. En affichant successivement et à la même position les différents mots d'une phrase, il est aussi possible d'obtenir une mesure de la vitesse de lecture, indépendante (ou presque) des facteurs oculomoteurs mais variant en fonction de l'excentricité et des caractéristiques visuelles des stimuli ([Rubin & Turano, 1994](#)). Cette technique permet aussi d'augmenter considérablement la vitesse de lecture car elle élimine le temps nécessaire à la programmation et à l'exécution des saccades inter-mots ; la vitesse est en moyenne multipliée par 4 chez les sujets sains, que ce soit en vision centrale ou en vision périphérique ([Chung et al., 1998](#)). L'amélioration des performances est cependant plus modérée pour les patients DMLA (38% d'augmentation chez [Harland et al., 1998](#)) ce qui montre que même lorsque l'excentricité et les mouvements oculaires sont contrôlés, d'autres facteurs limitent encore les performances de lecture chez les patients. Par conséquent, même si les résultats obtenus avec ce paradigme nous renseignent sur les phénomènes mis en cause, ils sont à prendre avec précaution et ne sont pas tous généralisables aux patients.

Le deuxième paradigme est la **simulation de scotome** (ou scotome artificiel) chez des sujets sains. Cette technique consiste à enregistrer les mouvements oculaires d'un sujet lisant des mots ou textes présentés sur un écran et à utiliser les données de positions recueillies pour afficher en temps réel, un masque, sur l'écran, à l'endroit où le sujet porte son regard. Cette technique a été utilisée dans plusieurs études ([Wensveen et al., 1995](#); [Fine & Rubin, 1999](#); [Bernard et al., 2007](#)) car elle permet l'étude des aspects visuels, oculomoteurs et stratégiques de la lecture en vision périphérique tout en évitant les contraintes médicales liées à l'expérimentation sur les patients. En effet, les caractéristiques du scotome (taille, forme, position, opacité) et du stimulus (taille, couleur, espacement des caractères) sont entièrement

paramétrables, et il est ainsi possible d'étudier l'influence de tous ces facteurs visuels sur les performances de lecture des participants. L'enregistrement des mouvements oculaires permet en plus d'étudier aussi les aspects oculomoteurs de la lecture ainsi que les stratégies mises en place par les sujets. Enfin, la possibilité d'utiliser des sujets naïfs permet de suivre l'évolution des performances et des stratégies au cours du temps, chose impossible chez des patients chez qui l'atteinte est déjà présente depuis plusieurs années. Les études de l'effet de l'apprentissage montrent, après seulement quelques heures d'entraînement, une amélioration des performances visuelles ainsi que l'élaboration de stratégies de lecture qui passent par la mise en place d'une ou plusieurs PRL extra-fovéales ([Varsori et al., 2004](#); [Bernard et al., 2007](#)). Le fonctionnement et les outils nécessaires à la simulation de scotome seront détaillés à l'Expérience 3 (Chapitre 7), dans laquelle nous avons utilisé un scotome artificiel afin de contraindre les participants à lire des phrases avec la partie inférieure de leur champ visuel.

3-3-2– Facteurs visuels limitant les performances de lecture

3-3-2-1 – La taille des caractères

Bien que la taille du scotome ne soit pas suffisante pour prédire la vitesse de lecture ([Crossland et al., 2005a](#)), il a été montré qu'il existait une corrélation entre la taille du scotome et la vitesse de lecture chez les patients DMLA ([Cummings et al., 1985](#); [Sunnness et al., 1996](#)) et chez les sujets utilisant un scotome artificiel ([Rayner & Bertera, 1979](#)) ce qui montre que l'excentricité des lettres est l'un des principaux facteurs limitant les performances de lecture en vision périphérique. Compte tenu des propriétés de l'acuité visuelle, on pourrait penser qu'il est possible de compenser les effets de l'excentricité par l'augmentation de la taille des caractères, mais plusieurs études montrent que ce n'est pas le cas ([Legge et al., 1985a](#); [1985b](#); [Chung et al., 1998](#)). La Figure 3.5 représente une partie des données obtenues par Chung et al. ([1998](#)) dans leur étude sur l'effet de la taille des caractères sur les performances de lecteurs sains soumis au paradigme RSVP en vision centrale et en vision périphérique. On observe tout d'abord que, dans une certaine gamme de taille, la vitesse de lecture augmente effectivement avec la taille des lettres mais elle atteint ensuite un plateau correspondant à la vitesse maximale de lecture (ou V_{max}). La taille correspondant au début du plateau est appelée taille de caractères critique (ou CPS pour *Critical Print Size* en anglais) ; c'est la plus petite taille de caractères permettant de lire à la vitesse maximale. Au

delà de ce CPS, l'augmentation de la taille des caractères n'entraîne plus d'amélioration des performances, et l'on observe même une diminution de la vitesse de lecture pour des tailles de caractères plus importantes (à partir de 2° en vision centrale; Legge et al., [1985a](#)). En comparant les deux courbes on constate aussi que le CPS augmente avec l'excentricité de présentation ; plus l'excentricité est importante, plus les caractères doivent être agrandis pour permettre une reconnaissance optimale. Il est important de noter, pour la suite de notre travail, que dans la plupart des expériences visant à étudier les performances de lecture des patients ([Chung et al., 1998](#); [Crossland et al., 2004a, 2005b](#)), le choix de la taille des caractères se fait en fonction du CPS. Si ce choix permet de s'assurer que la taille des caractères n'est pas un facteur limitant, il peut aussi poser problème car, comme nous l'avons dit précédemment, la taille des lettres peut influencer la taille de l'empan visuel (voir Section 2-2-3). Cette question de l'importance de la taille des caractères en vision centrale et en vision périphérique sera discutée dans le Chapitre 7. Enfin, on observe que même lorsque la taille des caractères est compensée, la vitesse maximale de lecture à 20° d'excentricité reste toujours près de 10 fois inférieure à la vitesse maximale en vision fovéale, suggérant que des facteurs visuels autres que la taille des caractères limitent aussi la lecture en vision périphérique.

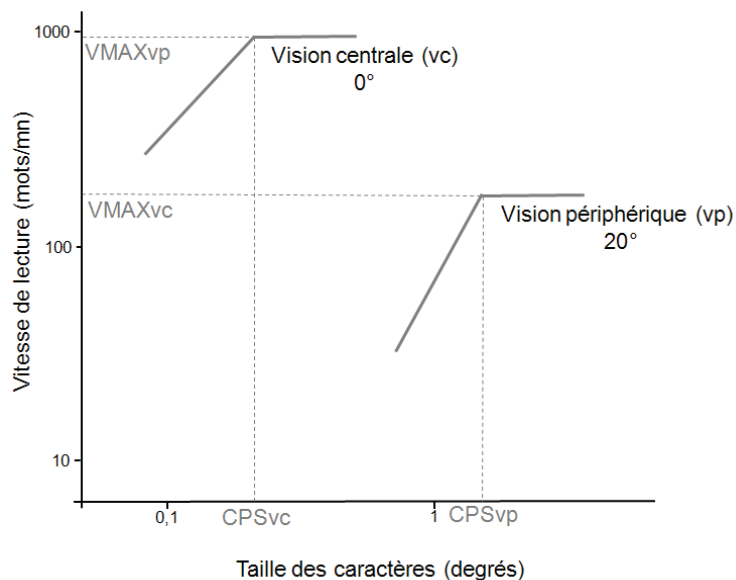


Figure 3.5- Vitesse de lecture en fonction de la taille des caractères (paradigme RSVP). La vitesse de lecture augmente avec la taille des caractères jusqu'à atteindre un plateau correspondant à la vitesse maximale (VMAX). La taille de caractères correspondant au début du plateau, notée CPS pour *Critical Print Size*, augmente avec l'excentricité du stimulus. La vitesse de lecture en vision périphérique reste toujours inférieure à celle en vision centrale, même lorsque l'on augmente la taille des caractères. Mesures obtenues chez des sujets sains par Chung et al ([1998](#))

3-3-2-2 – *Autres facteurs visuels*

Comme nous l'avons vu précédemment, l'augmentation de l'excentricité des stimuli s'accompagne d'une diminution de l'acuité visuelle, d'une augmentation de l'effet de l'encombrement, d'une diminution de la sensibilité au contraste et d'une augmentation du temps de traitement (voir Section 2-2-1). L'influence de ces quatre facteurs visuels a été étudiée dans plusieurs expériences utilisant le paradigme RSVP ou la simulation de scotome afin de définir les paramètres permettant d'améliorer au maximum les performances et le confort de lecture chez les patients.

La plupart des patients DMLA présentent des scotomes absolus qui les obligent à utiliser une PRL située au delà des limite du scotome, dans une zone du champ visuel où l'acuité est fortement diminuée. Et, même lorsque le scotome est dit « relatif » et présente des îlots de vision préservée, la sensibilité au contraste et l'acuité visuelle au niveau de ces « îlots » sont diminuées du fait de la présence de lésions rétiniennes. La valeur de l'acuité visuelle influence la valeur du CPS, en revanche, il a été montré que lorsque la taille des caractères est assez importante, le niveau d'acuité visuelle des patients n'est qu'un faible prédicteur de la vitesse de lecture ([Legge et al., 1992](#)).

L'encombrement spatial fait qu'une lettre située en périphérie est plus difficile à identifier lorsqu'elle est entourée d'autres caractères. Cet effet est encore plus contraignant chez les patients DMLA car il augmente rapidement avec l'excentricité. Certains auteurs ont même suggéré qu'il puisse être le principal facteur limitant la vitesse de lecture en vision normale et périphérique ([Pelli et al., 2007](#)). Mais réduire l'effet de l'encombrement est assez difficile. En effet, Chung ([2002](#)) a tenté d'améliorer la vitesse de lecture en augmentant l'espacement inter-caractères dans des mots situés en périphérie; mais écarter les lettres d'un mot, augmente aussi la distance entre le point de fixation et les lettres, et par conséquent, l'effet de l'encombrement devient plus important. Concernant l'encombrement vertical, c'est-à-dire l'espacement interligne, qui lui aussi peut limiter les performances lors de la lecture d'un texte, les résultats sont plus divergents. Tandis que Chung ([2004](#)) rapporte un bénéfice de 100% sur la vitesse de lecture en paradigme RSVP lorsque l'interligne est doublé, les études utilisant un scotome artificiel ([Bernard et al., 2007](#)), ou celles menées chez les patients DMLA ([Chung et al., 2008](#), [Calabrèse et al., 2010](#)) ne montrent qu'un effet très modéré puisque l'amélioration des performances n'est que de 8% pour une même augmentation de l'interligne.

La sensibilité au contraste diminue lorsque l'excentricité rétinienne augmente, et ce de façon plus importante pour les stimuli composés de hautes fréquences spatiales, comme les lettres par exemple (voir Chapitre 2, 2-1-2). Si la diminution du contraste entraîne la baisse des performances de lecture chez un sujet sain lisant en vision périphérique, il a été montré que cet effet était en moyenne 4 fois plus important pour un patient DMLA lisant à la même excentricité ([Rubin & Legge, 1989](#)). Pour le confort des patients, et pour ne pas limiter leurs performances de lecture, il est donc important de leur présenter des textes avec un contraste suffisant.

Enfin, comme l'avaient montré Legge et al ([2001](#)) dans leur expérience sur la mesure de la visibilité des lettres en vision centrale et périphérique (cf. Chapitre 2, 2-2-2), **le temps de traitement** augmente avec l'excentricité (voir aussi [Babkoff et al., 1985](#); [Lee et al., 2003](#) pour la reconnaissance de mots). Les résultats des études menées sur les patients vont dans le même sens ; en effet, Cheong et al. ([2008](#)) ont montré qu'il existait une corrélation entre le seuil temporel de reconnaissance de lettres et la vitesse de lecture chez les patients DMLA.

3-3-1-3 – Une réduction de l'empan visuel ?

La théorie dite de la diminution de l'empan visuel en vision excentrée, développée par Legge et al. ([1997a](#)), permet de faire le lien entre les notions d'acuité visuelle, d'encombrement et de temps de traitement du signal. Selon cette théorie, le principal facteur responsable de la diminution de la vitesse de lecture en vision périphérique serait la diminution de l'empan visuel ([O'Regan, 1990](#); voir Section 2-2-2) qui est le reflet des effets combinés de ces trois facteurs. Les auteurs appuient leur hypothèse sur le fait que, lorsque l'excentricité augmente, le temps de lecture en RSVP augmente plus rapidement pour les mots longs que pour les mots courts ([Legge et al., 2001](#)), suggérant que le nombre de lettres visibles en une fixation serait moins important en vision périphérique qu'en vision centrale. Grâce à un modèle simple basé sur la mesure de l'empan visuel et l'information lexicale, Legge et al. ([2001](#)) ont tenté de prédire la vitesse de lecture de mots chez des sujets sains utilisant un paradigme RSVP. Ce modèle fonctionne bien en vision centrale mais tend à sous-estimer les performances de lecture en vision périphérique. Selon les auteurs, cette différence s'explique en termes d'inférence lexicale : la diminution de l'empan visuel en vision périphérique serait en partie compensée par une utilisation plus importante des connaissances lexicales lorsque l'identification des lettres est insuffisante ou erronée. Plus récemment,

Cheong et al (2008) ont défini une nouvelle mesure, le taux de transfert d'information, calculée en divisant la taille de l'empan visuel par le temps de présentation du stimulus. Cette mesure est un meilleur prédicteur de la vitesse de lecture en RSVP que la taille de l'empan visuel seule. Cela suggère donc que la lecture en vision périphérique est limitée à la fois par la diminution de l'empan visuel mais aussi par l'augmentation du temps de traitement lorsque l'excentricité augmente. Cependant, elle ne suffit toujours pas à approcher correctement les performances en lecture normale car elle ne prend pas en compte les difficultés oculomotrices rencontrées durant la lecture de texte en vision périphérique.

3-3-3 – Aspects oculomoteurs de la lecture en vision excentrée

3-3-3-1 – Limites de l'oculométrie pour la lecture de texte

L'oculométrie chez les patients permet d'étudier les caractéristiques des mouvements oculaires ainsi que les facteurs oculomoteurs limitant la vitesse de lecture en vision périphérique, mais elle pose le problème de la détermination de la position de fixation durant la tâche de lecture. En effet, lorsque l'on utilise un oculomètre, il est nécessaire de connaître la correspondance entre l'orientation de l'œil dans l'orbite et la position fixée sur l'écran. Pour cela, on effectue avant chaque bloc d'essai, une étape de calibrage durant laquelle le sujet a pour consigne de fixer des cibles qui apparaissent successivement en différents points de l'écran. Cette étape ne pose aucun problème en vision centrale, puisqu'en l'absence de contraintes visuelles, les sujets normaux utilisent presque exclusivement leur fovéa, que ce soit pour fixer une cible ou pour lire un texte. Mais, comme nous l'avons expliqué précédemment, les patients DMLA peuvent utiliser plusieurs PRL différentes selon la tâche effectuée ou selon les caractéristiques du stimulus (Guez et al., 1993; Sunness et al., 1996), et il n'existe aucun moyen de s'assurer que la PRL utilisée lors de la lecture est la même que celle utilisée lors du calibrage, ni même si le sujet conserve la même PRL durant tout le bloc d'essais. L'utilisation d'un SLO pose le même problème, car même si l'on projette le texte directement sur la rétine du patient, on ne peut pas connaître avec certitude la partie du champ visuel dans laquelle il porte son attention à un moment donné. En utilisant un scotome artificiel qui couvre une partie plus importante du champ visuel (scotome hémichamp par exemple), il est cependant possible de contraindre les participants à utiliser des zones particulières de leur rétine pour lire et de comparer les performances entre, par exemple, une

PRL gauche vs. droite ([Fine & Rubin, 1999](#)) ou latérale vs. inférieure ([Lingnau et al., 2008](#)). Les études sur le comportement oculomoteur durant la lecture en vision périphérique permettent donc seulement de situer approximativement la PRL des patients ou des sujets utilisant un scotome artificiel durant la lecture ou d'établir des corrélations entre les résultats obtenus lors d'une tâche de fixation et ceux obtenus lors d'une tâche de lecture ([Crossland et al., 2004a](#); [Castet & Crossland, 2012](#)).

3-3-3-2 – Caractéristiques de mouvements oculaires durant la lecture en vision périphérique

Bien qu'elles ne permettent pas de déterminer de façon précise l'endroit où se porte l'attention du sujet, les méthodes d'enregistrement des mouvements oculaires nous renseignent sur les caractéristiques des saccades et des fixations durant la lecture en vision périphérique. Les patients atteints de DMLA ainsi que les sujets utilisant un scotome artificiel ont un contrôle oculomoteur moins performant que les lecteurs normaux ; lorsqu'ils lisent une phrase, ils ont plus de difficultés à suivre la ligne de texte ([Lingnau et al., 2008](#); cf. Figure 3.6), ils effectuent un nombre plus important de saccades (progressives et régressives), et leurs saccades progressives ont une amplitude moyenne réduite (3,5 lettres contre 7 lettres pour les sujets sains ; [Crossland & Rubin, 2006](#)) par rapport à celle des sujets contrôles. La durée moyenne des fixations n'est, quant à elle, globalement pas modifiée par la présence d'un scotome, étant donc de l'ordre de 225-250 ms en moyenne ([Rumney & Leat, 1994](#); [Bullimore & Bailey, 1995](#); [Crossland & Rubin, 2006](#)). Ces résultats ont aussi été obtenus chez des sujets lisant avec un scotome artificiel ([Scherlen et al., 2008](#)). Les premières expériences étudiant les relations entre les variables oculomotrices et la vitesse de lecture ont toutes conclu que le principal prédicteur de la vitesse de lecture était la composante horizontale moyenne des saccades progressives (92% de la variance expliquée chez [Bullimore & Bailey, 1995](#)), calculée en divisant le nombre de lettres de la phrase par le nombre de saccades progressives effectuées (L/FS pour « *letters by forward saccade* ») : plus l'amplitude moyenne des saccades progressives est importante, plus la vitesse de lecture est importante. Ces résultats tendent à soutenir l'hypothèse de la diminution de l'empan visuel en vision excentrée proposée par Legge et al. ([1997a](#)). En effet, il est possible que les lecteurs porteurs d'un scotome (naturel ou artificiel) aient plus de mal à extraire les lettres les plus éloignées du point de fixation et soient donc contraints d'effectuer des saccades plus courtes que les sujets sains lisant en vision centrale. Mais l'analyse des résultats menée par Scherlen et al.

(2008), plus précise et basée sur une régression multiple, a montré que les deux principaux facteurs corrélés à la vitesse de lecture étaient le nombre de saccades (quelle que soit leur direction) et la durée moyenne des fixations ($r^2 = -0,72$ et $-0,16$ respectivement) et que la corrélation entre l'amplitude des saccades et la vitesse de lecture n'était pas significative. Le fait que la durée des fixations augmente lorsque la vitesse de lecture diminue supporterait plutôt l'hypothèse d'une augmentation du temps de traitement en vision périphérique que celle d'une diminution de l'empan visuel. En effet, les auteurs expliquent que cette augmentation de la durée des fixations n'est présente que lorsque la vitesse de lecture n'est pas au maximum, c'est-à-dire, lorsque le traitement est difficile (petite taille de caractères). Lorsque la taille des caractères est au-dessus du CPS, il n'y a plus de différence significative dans les durées de fixation, que ce soit en fonction de la vitesse de lecture ou de l'excentricité de lecture, comme c'était le cas dans les études sur les patients (Rumney & Leat, 1994; Bullimore & Bailey, 1995; Crossland & Rubin, 2006) dans lesquelles la taille des caractères était aussi supérieure au CPS. L'hypothèse de la diminution de l'empan visuel et celle de l'augmentation du temps de traitement ne sont donc pas incompatibles, elles vont plutôt, comme l'ont proposé Cheong et al (2007, 2008), dans le sens d'un effet combiné de ces deux facteurs dans la diminution des performances.

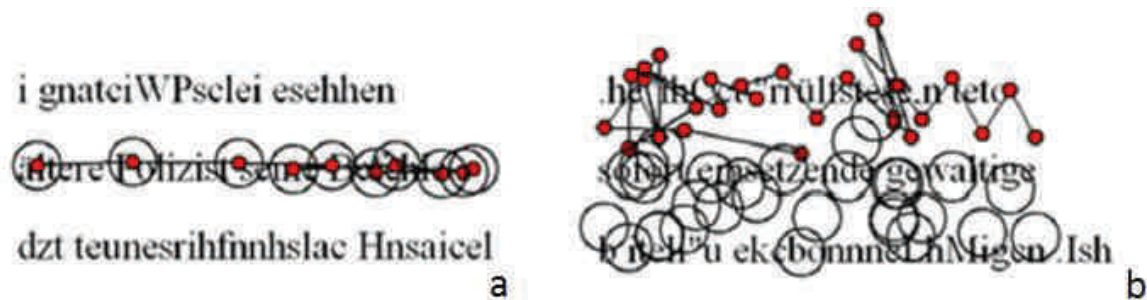


Figure 3.6- Patterns oculomoteurs chez des sujets sains contraints d'utiliser une zone particulière de leur champ visuel pour la lecture de texte. Les points rouges représentent la position de fixation (fovéa) et les cercles, la zone du champ visuel dans laquelle le sujet peut lire (tout le reste étant masqué). Le contrôle oculomoteur en vision périphérique (b) est moins performant qu'en vision centrale (a). Lorsque les sujets sont contraints d'utiliser une zone du champ visuel située $2,4^\circ$ en dessous du point de fixation, ils ont plus de difficultés à déplacer leur regard le long de la ligne de texte ; les saccades sont plus nombreuses et moins bien orientées (extrait de [Lingnau et al., 2008](#)).

3-3-3-3 – Facteurs oculomoteurs limitant les performances de lecture en vision excentrée

Les difficultés oculomotrices rencontrées par les patients DMLA sont liées à deux mécanismes qui deviennent moins performants en vision périphérique : **la programmation saccadique et la stabilité de fixation.**

En vision centrale, la programmation d'un mouvement en direction d'une cible est calculée dans un référentiel ayant pour origine la fovéa. Les saccades de fovéation (*foveating saccades*, en anglais), ayant pour but de centrer un élément sur la fovéa, sont donc rapides, précises et quasi-automatiques ([Von Noorden & Mackensen, 1962](#); [White & Bedell, 1990](#); [Whittaker Stephen G. et al., 1991](#)). En présence d'un scotome central en revanche, même si dans certains cas des adaptations stratégiques, et parfois corticales, sont possibles ([White & Bedell, 1990](#); [Baker et al., 2005](#) cf. [3-2-2-1](#)), les saccades qui amènent la cible sur la PRL sont toujours moins rapides et moins précises qu'en vision centrale. Les distributions des points d'atterrissage des saccades en direction d'une cible sont plus dispersées pour les patients DMLA, cette dispersion étant corrélée à l'amplitude des saccades ([Whittaker Stephen G. et al., 1991](#)) et à l'excentricité de la PRL ([White & Bedell, 1990](#)). Ceci peut s'expliquer par le fait que la programmation saccadique en présence d'un scotome n'est pas automatique mais nécessite un effort attentionnel supplémentaire pour ajuster la position d'atterrissage de la saccade, afin qu'à l'arrivée, la cible ne soit pas masquée par le scotome. L'étude menée en IRM fonctionnelle par Little et al. ([2008](#)) va dans ce sens. Les auteurs ont comparé les régions corticales primaires et associatives impliquées dans les mouvements oculaires entre des sujets sains et des patients DMLA. Ils ont montré que, chez les patients, la programmation et l'exécution des saccades vers une cible, entraînaient une activation moins importante du cortex visuel (V1 à V5), et au contraire, une activation plus importante des régions associatives impliquées dans les processus d'attention et d'effort cognitif (cortex préfrontal, sillon intrapariétal). Dans une tâche de lecture, il est difficile de déterminer la précision des saccades, mais il est cependant possible de mettre en évidence des corrélations entre la vitesse de lecture et des performances obtenues dans une tâche de visée de cible pour obtenir une preuve indirecte du rôle de la programmation saccadique sur les performances de lecture. McMahon et ses collaborateurs ont ainsi montré que la vitesse de lecture était inversement proportionnelle au nombre de saccades effectuées dans une tâche de séquençage d'une série de 5 lettres ([McMahon et al., 1991](#), la tâche des patients étaient de fixer successivement 5 lettres séparées chacune de 5°) et qu'un entraînement oculomoteur permettait d'améliorer les

performances de lecture de texte chez les patients DMLA ([McMahon et al., 1993](#), voir aussi [Seiple et al., 2005](#)).

En plus des difficultés à programmer des saccades rapides et précises, les patients rencontrent aussi des difficultés à maintenir leur regard stable dans une zone proche de la cible. Nous avons vu que le MP-1 permettait d'obtenir une évaluation de la stabilité du regard durant une tâche de fixation en calculant automatiquement le pourcentage de points de fixation contenus dans une zone circulaire de, par exemple, 4° autour de la cible (cf. Figure 3.3). Mais cette mesure est mal adaptée car elle ne renseigne pas sur la dispersion des points de fixation en dehors de la zone d'inclusion. De plus, elle ne permet pas d'évaluer séparément la stabilité le long du méridien horizontal et celle le long du méridien vertical. Enfin, il a été montré qu'elle n'était pas corrélée avec les performances de lecture des patients ([Crossland et al., 2009](#)). Il est donc plus approprié d'évaluer la stabilité de fixation à partir du calcul de l'aire d'une zone elliptique contenant un pourcentage P des points de fixation (généralement 68%, [Timberlake et al., 1986](#); [Crossland et al., 2009](#)) enregistrés durant une tâche de fixation. Cette zone, appelée BCEA (pour *Bivariate Contour Ellipse Area*), se calcule à partir des écarts types des distributions des positions de fixation en x et en y (σ_x et σ_y) ainsi que de leur coefficient de corrélation de Pearson (ρ) ([Steinman, 1965](#); cf. Figure 3.7). Le calcul de la BCEA implique donc que les distributions des points de fixations soient unimodales et normales. Plus l'aire de la BCEA est importante, moins la stabilité de fixation est bonne ; pour les participants sains, les études rapportent des valeurs moyennes de BCEA allant de 80 à 1200 minarc², équivalant à une zone de fixation d'environ 0,14 à 0,63° de diamètre ([Whittaker S. G. et al., 1988](#); [White & Bedell, 1990](#)). Cette valeur augmente de façon importante en présence d'un scotome, chez les participants sains (entre 3 et 4 fois plus importante à 10° d'excentricité, [Sansbury et al., 1973](#)) et de façon plus critique encore chez les patients (de 500 à 13000 minarc², soit une zone de 0,42 à 2,13° de diamètre, [Crossland et al., 2009](#); [Dunbar et al., 2010](#)). Chez les patients, l'aire de la BCEA ne semble pas être corrélée à la taille du scotome ([Crossland et al., 2004a](#), mais voir [Whittaker S. G. et al., 1988](#)), à l'acuité visuelle ([Timberlake et al., 1986](#); [Crossland et al., 2004a](#)) ou à l'excentricité de la PRL ([Reinhard et al., 2007](#); [Greenstein et al., 2008](#)), mais elle montre, en revanche, une corrélation négative avec la vitesse de lecture, que ce soit en RSVP ([Crossland et al., 2009](#)) ou en lecture de texte ([Crossland et al., 2004a](#); [2009](#)) : plus les patients présentent une aire de BCEA importante plus leur vitesse de lecture est faible. Ces résultats suggèrent qu'une partie des difficultés rencontrées lors de la lecture en vision périphérique est due à la difficulté de

maintenir le regard stable pendant l'identification du mot, mais ce n'est pas certain, et cela pour plusieurs raisons. La première est que, comme pour la programmation saccadique, les mesures de stabilité de fixation sont toujours obtenues durant des tâches de fixation de cibles ; elles ne permettent donc pas d'inférer avec certitude le comportement oculomoteur des patients durant la tâche de lecture ([Castet & Crossland, 2012](#)). Le deuxième problème, soulevé aussi par Castet et Crossland ([2012](#)), réside dans le calcul de la BCEA. En effet, lorsque l'on mesure la dispersion des points de fixation pendant une durée prolongée (généralement entre 10 et 30 secondes), le patient effectue plusieurs saccades et l'aire de fixation enregistrée rassemble donc en réalité plusieurs fixations différentes. Les études utilisant comme indice l'aire de la BCEA ne font, en général, pas la distinction entre les points appartenant à des fixations différentes, et ne permettent donc pas de faire la différence entre une fixation ayant une aire de dispersion importante (beaucoup de dérives et/ou de microsaccades) et plusieurs fixations dont la dispersion est plus faible mais qui sont éloignées les unes des autres. Cette question sera abordée plus en détails dans le Chapitre 6. Enfin, Déruaz et al. ([2004](#)) ont proposé l'hypothèse selon laquelle l'instabilité de fixation n'aurait pas forcément un effet néfaste mais pourrait, au contraire, favoriser la reconnaissance des mots en évitant le fading lié à l'effet Troxler (cf. Section 1-2-2).

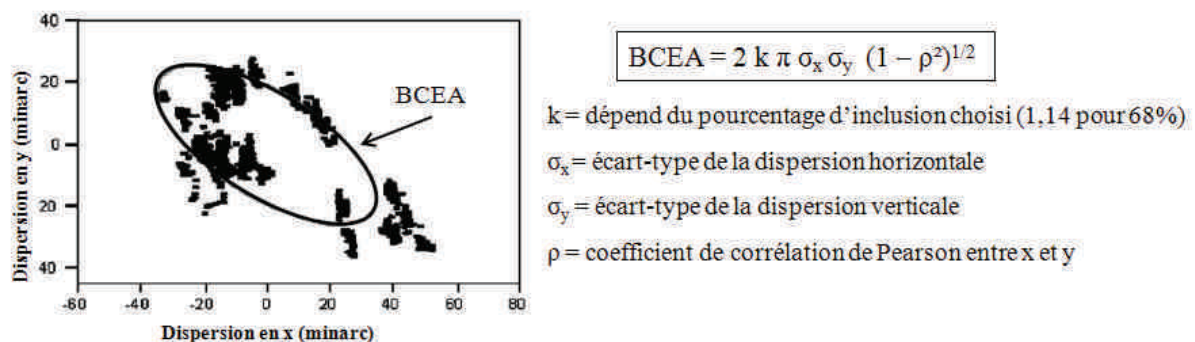


Figure 3.7- Mesure de la stabilité de fixation et calcul de la BCEA (*Bivariate Contour Ellipse Area*) chez un patient atteint d'un scotome maculaire avec un SLO. Durée d'enregistrement = 10 secondes. Modifié depuis [Crossland et al., 2004b](#)

3-3-4 – PRL et lecture

L'analyse du comportement oculaire des patients permet aussi, dans une certaine mesure, d'étudier les adaptations stratégiques mises en place lors de la lecture, en particulier les facteurs qui influencent le choix de la position de la PRL et les conséquences de ce choix sur les performances de lecture. Les deux principales questions qui se posent sur les choix stratégiques des patients sont de savoir (1) s'il existe une position de PRL optimale, et (2) si les patients utilisent une ou plusieurs PRL durant la lecture.

3-3-4-1 – Une position de PRL optimale ?

Même si, comme nous l'avons expliqué précédemment, il est difficile de déterminer avec exactitude la position de la PRL durant une tâche de lecture, les études effectuées sur les patients porteurs d'un scotome maculaire et lisant de gauche à droite suggèrent une utilisation préférentielle des champs visuels gauche et inférieur pour la lecture de texte ([Guez et al., 1993](#)). Même si ce n'est pas mentionné dans la littérature, il semblerait que cette préférence soit aussi présente chez les sujets sains lisant avec un scotome artificiel (communication personnelle, J.B. Bernard). Théoriquement, l'avantage d'une PRL inférieure peut s'expliquer par le fait qu'elle permette de lire les mots sans masquer avec le scotome la ligne lue ni la portion de texte à venir. Un autre intérêt, mis en avant par Petre et al. ([2000](#)) et que nous développerons dans le Chapitre 5, est qu'une position de PRL verticale permet de réduire l'excentricité absolue des lettres les plus extrêmes du mot et devrait par conséquent en augmenter la visibilité. De plus, He et al. ([1996](#)) ont montré que les performances attentionnelles étaient meilleures dans le champ visuel inférieur que dans le champ visuel supérieur. En revanche, l'utilisation d'une PRL située à gauche du scotome peut paraître contre-intuitive. En effet, cette position présente tout d'abord le désavantage de masquer une partie du texte à venir et éventuellement de gêner la programmation d'une saccade vers la droite. De plus, comme nous l'avons expliqué dans le Chapitre 2, les expériences sur l'identification de lettres dans des chaînes de caractères ([Bryden, 1970](#); [Nazir et al., 1991](#); [Legge et al., 2001](#)) ou sur la reconnaissance de mots ([O'Regan, 1981](#); [Brysbaert et al., 1996](#)) montrent plutôt un avantage du champ visuel droit, que du champ visuel gauche. Guez et al ([1993](#)) ont aussi proposé que l'utilisation d'une PRL gauche permettrait aussi de contrôler la position de l'œil par rapport à la fixation précédente et de s'assurer qu'aucune partie du texte n'ait été sautée. Si, théoriquement, le choix d'une PRL inférieure semble plus avantageux, les

études menées sur les patients DMLA n'ont mis en évidence aucune corrélation entre le choix de la position de la PRL durant une tâche de fixation et les performances de lecture de texte ([Fletcher et al., 1999](#); [Crossland et al., 2005a](#)). En revanche, lorsque l'on force des patients à utiliser une zone particulière de leur champ visuel périphérique pendant une durée prolongée (appelée TRL pour « *Trained Retinal Locus* »), on observe, après la période d'apprentissage, des vitesses de lecture plus importantes pour des TRL verticales, situées au dessus ou en dessous de la fovéa, que pour des TRL horizontales ([Nilsson et al., 2003](#)). Cette différence dans les effets observés entre les cas cliniques et les lecteurs utilisant une TRL pourrait être attribuée au fait que les patients se sont habitués à utiliser leur PRL de manière optimale (même si celle-ci n'était pas a priori la meilleure) ou bien au fait qu'ils utilisent plus d'une PRL durant les tâches de lecture, comme développé ci-dessous.

3-3-4-2 – Une ou plusieurs PRL ?

La détermination du nombre de PRL dépend de la taille de la zone que l'on définit comme étant une PRL; en effet, selon les critères fixés, une distribution de points de fixation donnée peut être considérée comme une seule PRL avec une aire importante ou au contraire deux PRL distinctes ayant chacune une plus petite zone de dispersion. Crossland et al. ([2004b](#)) ont proposé d'appliquer une méthode d'ajustement de distribution 2D (ou KDE pour *Kernel Density Estimation* en anglais, [Silverman, 1986](#); [Bowman & Foster, 1992](#)) aux données recueillies lors de la tâche de fixation. Cette méthode permet d'avoir une représentation visuelle du nombre de pics mais la KDE n'est pas suffisante pour affirmer que les pics observés sont significatif. Pour cela, l'analyse peut être complétée par une analyse statistique de la significativité des pics (outil *SiZer*, [Chaudhuri & Marron, 1999](#); [Calabrèse, 2011](#), voir Chapitre 6). Le deuxième problème rencontré est qu'en général, la position et la stabilité de la PRL sont déterminées durant une tâche de fixation et sont considérées comme étant les mêmes durant la tâche de lecture (mais voir [Calabrèse et al., 2011](#)), mais rien ne permet de s'assurer que ce soit toujours le cas. Même dans les expériences utilisant un SLO, où les mots sont projetés directement sur la rétine, il est impossible de savoir dans quelle partie de son champ visuel le sujet porte son attention à un moment donné. L'étude de Calabrèse ([2011](#)) montre cependant qu'il est possible de s'affranchir partiellement de ces deux problèmes. Dans une tâche de lecture chez des patients porteurs d'un scotome, elle a analysé la distribution verticale des positions de fixation et a pu déterminer la façon dont les

patients positionnaient leur PRL par rapport à la ligne de texte (PRL verticale ou latérale) et, dans le cas d'une stratégie verticale, s'ils utilisaient une ou plusieurs PRL. Ces données suggèrent que la plupart des participants utilisant une stratégie verticale ne changeaient pas de PRL au cours de la tâche.

Même si la position et le nombre de PRL sont difficiles à déterminer, les résultats obtenus par Déruaz et al. (2002) suggèrent qu'il est possible d'utiliser différentes PRL en fonction de la taille des caractères ou de la longueur du mot. Duret et al. (1999) ont proposé une explication à ces changements en termes de stratégies de lecture : les patients utiliseraient préférentiellement une PRL latérale pour identifier le début ou la fin d'un mot, en positionnant leur scotome sur la ligne de texte et plutôt une PRL supérieure ou inférieure pour analyser le mot dans sa globalité et extraire des informations sur sa forme ou sa longueur. Les patients adapteraient aussi la position de leur PRL en fonction de la position du mot sur la ligne (Déruaz et al., 2002). Pour éviter de fixer les mots de manière trop excentrée, ils fixeraient préférentiellement les mots situés au début de la ligne avec la partie gauche de leur champ visuel, et inversement, utiliseraient leur champ visuel droit pour identifier les mots situés à droite. Mais Crossland et al. (2004b) ont observé chez les patients DMLA, une corrélation négative entre l'ancienneté de l'atteinte et le nombre de PRL, suggérant donc que la multiplicité des PRL serait plutôt une étape préliminaire à l'établissement d'une PRL définitive unique. Mais cela n'est pas le cas pour tous les patients, notamment pour les patients Stargardt, qui, eux, peuvent utiliser plusieurs PRL même après de nombreuses années d'atteinte (Safran et al., 1999; Calabrèse, 2011).

Les résultats obtenus chez les patients et les lecteurs sains sont assez contradictoires et ne permettent pas de trancher en faveur d'une stratégie de réadaptation optimale pour les personnes atteintes de DMLA. A l'heure actuelle, la méthode la plus couramment adoptée par les orthoptistes est de conserver et de renforcer la PRL choisie spontanément par les patients même si celle-ci n'est pas, théoriquement, la plus adaptée à la lecture.

CHAPITRE 4 : PROBLEMATIQUE

Les aspects visuomoteurs de la lecture en vision centrale et en vision périphérique sont, la plupart du temps, abordés de manière indépendante par deux champs d'étude assez distincts ; le premier est centré sur la compréhension et la modélisation de phénomènes observés en conditions normales, et l'autre a pour objectif principal l'amélioration des performances de lecture des patients porteurs d'un scotome. Mais lorsque l'on rassemble les données de la littérature, on remarque souvent une continuité dans les performances visuelles et oculomotrices lorsque l'excentricité augmente. Ceci qui suggérerait plutôt la mise en jeu de mécanismes communs dans la lecture en vision centrale et en vision périphérique. Ce travail se situait à l'intersection entre ces deux domaines et avait pour but d'apporter une vision plus globale des mécanismes de la lecture.

Notre premier axe d'étude se concentrait sur **l'effet des facteurs visuels sur la reconnaissance de mots en vision centrale et périphérique** (voir Chapitre 5). De nombreuses études ont déjà mis en évidence le rôle de l'acuité visuelle, de l'encombrement et du temps d'exposition des lettres et des mots dans la lecture en vision excentrée (voir Chapitre 2). En particulier, Legge et al. ([2001](#)) ont réalisé une étude paramétrique permettant d'estimer la taille de l'empan visuel en fonction de l'excentricité verticale de présentation des lettres. Néanmoins, cette étude et les autres reposaient sur la visualisation de mots magnifiés en vision périphérique, c'est-à-dire dont la taille des lettres était augmentée pour compenser la baisse d'acuité visuelle en vision périphérique. De ce fait, elles rendaient difficile la comparaison des performances et des facteurs contribuant à la reconnaissance des mots en vision centrale et périphérique. Afin de pallier ce manque, notre étude visait à tester les variations éventuelles d'un phénomène, l'effet OVP, déjà largement étudié en vision centrale ([O'Regan et al., 1984](#); [Brysbart et al., 1996](#); Section 2-3), mais encore peu exploré en vision excentrée. A notre connaissance, seule une étude, réalisée par Battista et Kalloniatis ([2002](#)) avait tenté d'explorer en détails le devenir de l'effet OVP en fonction de la position verticale des mots, et cette étude était discutable d'un point de vue méthodologique. Or, ce phénomène, déterminé au moins en partie par des facteurs visuels, semblait constituer l'outil idéal pour estimer la continuité des performances entre vision centrale et périphérique. De plus, comme nous allons le voir, notre approche promettait non seulement d'ouvrir une nouvelle piste pour

l'étude de la lecture en vision périphérique, mais aussi de mieux renseigner l'origine de l'effet OVP en vision centrale.

L'effet OVP montre qu'un mot est plus facilement et plus rapidement reconnu lorsque le regard fixe légèrement à gauche du centre du mot que lorsqu'il fixe initialement le début ou la fin du mot. Il est principalement attribué aux effets combinés de facteurs visuels et lexicaux. Lorsque la fixation est alignée avec le centre d'un mot, le nombre de lettres du mot se retrouvant dans l'empan visuel est plus élevé ([McConkie et al., 1989](#); [Nazir et al., 1991](#)). De plus, une fixation au centre des mots permet de reconnaître le plus précisément les lettres qui sont les plus informatives pour l'accès à la représentation lexicale du mot ([Clark & O'Regan, 1999](#); [Stevens & Grainger, 2003](#)). Jusqu'alors, les études n'étaient pas parvenues à distinguer, sans ambiguïté, les contributions respectives des facteurs visuels et lexicaux. Deux expériences réalisées par Nazir et collaborateurs suggéraient une influence de la visibilité des lettres sur les pentes des courbes OVP. Cependant, les manipulations utilisées, à savoir l'augmentation de la taille de l'espace inter-caractères ([Nazir et al., 1992](#)), et la compensation de l'excentricité horizontale par une augmentation progressive de la taille des caractères (expérience « papillon », [Nazir et al., 1998](#)), présentaient l'inconvénient de modifier la forme habituelle des mots. Notre étude de l'effet OVP pour deux positions verticales de présentation des mots, 0° ou 3° en dessous du point de fixation, semblait pouvoir instruire ce débat en mettant éventuellement en évidence le rôle de l'acuité visuelle et de l'encombrement dans le phénomène OVP, mais cette fois, sans changer la forme des mots. En effet, selon les propriétés géométriques de l'acuité et de l'encombrement, la visibilité des lettres présentées en dessous du point de fixation devrait diminuer moins rapidement lorsque le décalage horizontal augmente. Ainsi, sous l'hypothèse où le phénomène OVP reflète l'influence de facteurs visuels ([McConkie et al., 1989](#); [Nazir et al., 1991](#) mais aussi [Stevens & Grainger, 2003](#)), il devrait être moins marqué dans le champ visuel inférieur.

La première implication de ces résultats pour la lecture en vision périphérique serait alors que l'empan visuel augmente en vision excentrée, tout au moins lorsque l'excentricité de présentation n'est pas compensée par la taille des lettres, ce qui n'a encore jamais été mis en évidence. Par ailleurs, l'observation d'un affaiblissement de l'effet OVP dans le champ visuel inférieur apporterait aussi des arguments théoriques supplémentaires en faveur du choix d'une PRL verticale pour la lecture en présence d'un scotome. Plusieurs hypothèses soutiennent déjà l'avantage d'une PRL verticale, et plus précisément d'une PRL située en dessous du scotome, pour la lecture de texte (voir Chapitre 3). L'observation éventuelle d'un effet OVP moins

marqué dans la condition décalée verticalement signifierait qu'il n'est pas aussi important d'aligner son regard avec le centre des mots lorsque ceux-ci sont présentés en dessous du point de fixation que lorsqu'ils sont sur le même axe horizontal. Ce résultat serait critique pour les patients DMLA qui présentent, la plupart du temps, un contrôle oculomoteur beaucoup moins performant que les sujets normaux.

La deuxième expérience que nous avons menée avait pour objectif de compléter l'étude de la lecture en vision périphérique. Elle se proposait d'étudier **l'influence de la qualité du contrôle oculomoteur, et plus précisément le rôle de la stabilité de fixation, sur la vitesse de lecture en vision périphérique** (voir Chapitre 6). En effet, si l'acuité visuelle et l'encombrement sont inévitablement des facteurs limitants pour la lecture en vision périphérique, le rôle des facteurs oculomoteurs reste encore discutable. Plusieurs études ont déjà été réalisées, suggérant que la qualité de la fixation (en termes de stabilité) et de la programmation saccadique contraignent aussi fortement les performances de lecture en vision périphérique. Néanmoins, la plupart de ces études reposaient sur des corrélations entre des mesures de la stabilité du regard durant une tâche de fixation et des performances de lecture de phrases ou de texte (cf. [Castet & Crossland, 2012](#)) ; elles ne permettaient donc pas d'établir un lien de causalité entre la stabilité de fixation et la vitesse de lecture. Notre étude avait pour objectif de tester ce lien causal, en tentant de manipuler la stabilité de fixation par la stimulation visuelle fovéale, et en testant son effet directement, c'est-à-dire durant une seule et même tâche, sur la vitesse de lecture de phrases présentées en vision périphérique.

Ainsi, notre paradigme consistait à forcer des participants sains à utiliser exclusivement leur champ visuel inférieur périphérique (excentricité minimale = 3°) pour lire des phrases présentées à l'écran. Nous avons comparé une condition contrôle (avec un scotome artificiel uniforme) à deux conditions expérimentales dans lesquelles le scotome présentait une ouverture sur une zone texturée, stable par rapport au texte, et dont le but était de renforcer la stabilité de fixation. Nous nous attendions à un effet positif de cette manipulation sur la stabilité de fixation, mais aussi sur la vitesse de lecture, tout au moins sous l'hypothèse où la stabilité de fixation influence effectivement la vitesse de lecture. Un éventuel effet facilitateur de la stimulation fovéale présenterait aussi l'avantage de proposer une aide à la lecture pour les patients DMLA porteurs de scotomes présentant des îlots de vision préservée en fovéa; celle-ci consisterait à présenter un fond texturé en vision fovéale.

Enfin, la troisième expérience présentée ici concernait l'étude de l'effet d'un paramètre souvent négligé dans les expériences sur la lecture, **la taille des caractères, sur les mouvements oculaires** (voir Chapitre 7). Dans les domaines de la lecture en vision normale et en vision périphérique, la taille des caractères est depuis longtemps considérée comme un facteur qui, dans une certaine gamme (taille supérieure au CPS), n'influence pas les performances de lecture ni le comportement oculomoteur (pour une revue voir [Rayner, 1998](#)). Mais les mesures sur lesquelles reposent ces observations, à savoir la vitesse de lecture d'une part et l'amplitude des saccades et les durées des fixations d'autre part, sont très grossières. En effet, elles ne reposent que sur des valeurs moyennes et n'informent pas sur les éventuelles variations du comportement inter- et intra-mots (i.e. position précise du regard au sein ou dans le voisinage des mots, probabilité de refixation, durée des fixations individuelles) en fonction de la taille des caractères. Or cette question est fondamentale. Tout d'abord, elle pourrait contribuer à mieux comprendre les processus et mécanismes sous-jacents aux déplacements du regard en lecture normale. De plus, elle pourrait éventuellement remettre en cause les mesures actuelles de la taille de l'empan visuel en vision périphérique, qui, rappelons-le, sont effectuées dans des conditions où les lettres sont magnifiées. Enfin, elle pourrait forger de nouvelles pistes pour l'étude et l'aide de la lecture en vision périphérique. Notre troisième expérience visait donc à réexaminer le rôle de la taille des caractères sur le comportement oculaire lors de la lecture en vision centrale. Elle s'appuyait sur l'effet du site de départ sur l'amplitude des saccades, ainsi que les effets I-OVP et rOVP (pour la durée des fixations et la probabilité de refixation sur un mot respectivement), qui présentent l'avantage d'être des phénomènes robustes et dont l'origine, bien qu'encore discutée, serait vraisemblablement visuomotrice. La mise en évidence d'un rôle significatif de la taille des lettres sur l'amplitude des saccades et/ou la durée des fixations remettrait en cause certaines des hypothèses fondatrices des modèles actuels de la lecture en vision normale.

Ce travail présente l'intérêt d'aborder de façon conjointe l'étude des effets des facteurs visuels et oculomoteurs dans la lecture en vision centrale et périphérique. Les résultats obtenus suggèrent une continuité dans les effets des facteurs visuels et dans certains facteurs oculomoteurs. Ils montrent aussi que certains aspects du comportement oculomoteur sont spécifiques à la lecture en vision périphérique mais seraient aussi à prendre en compte dans l'élaboration d'un modèle plus global de la lecture.

CHAPITRE 5 : ETUDE DE LA RECONNAISSANCE DE MOTS EN VISION CENTRALE ET PERIPHERIQUE

5-1 – INTRODUCTION

5-1-1 – L'effet OVP en vision centrale

L'effet OVP est un phénomène robuste qui montre que les performances de reconnaissance des mots ainsi que le comportement oculomoteur sur les mots varient de manière systématique en fonction de la position initiale du regard dans les mots ([O'Regan et al., 1984](#)). La probabilité d'identifier correctement un mot est maximale lorsque le regard fixe initialement une position légèrement à gauche du centre du mot, puis elle diminue à mesure que la fixation s'éloigne de cette position optimale ([Nazir et al., 1991](#); [Brybaert et al., 1996](#)), alors que le temps pour dénommer un mot ou effectuer une tâche de décision lexicale montre une relation inverse avec la position initiale de fixation, étant minimal près du centre des mots ([O'Regan & Jacobs, 1992](#)). De la même façon, la probabilité de refixer un mot est plus faible, et le temps total de regard sur le mot est plus court, lorsque la fixation initiale est légèrement à gauche du centre du mot que lorsqu'elle est au début ou à la fin du mot. Ce dernier effet, d'abord mis en évidence dans des tâches de reconnaissance de mots isolés est aussi présent, mais cependant moins marqué, lors de la lecture de texte ([Vitu et al., 1990](#)).

Dans le cadre de la reconnaissance de mots isolés, le paradigme classique consiste à présenter des mots pour une durée brève (généralement de 30 à 150 ms, afin d'éviter les effets de plafond; voir [Brybaert et al., 1996](#)) et à des excentricités horizontales variables. Par convention, l'excentricité horizontale est représentée par le décalage, en nombre de lettres, entre le centre du mot et le point de fixation : les valeurs de décalage positives correspondent au cas où le regard fixe à droite du centre du mot, et inversement, les valeurs négatives correspondent aux positions de fixation situées à gauche du centre. Lorsque l'on représente la probabilité d'identification correcte en fonction de la position de fixation, on obtient une courbe OVP caractéristique, en forme de U inversé, avec un maximum aux environs de la position '-1' (fixation légèrement à gauche de la lettre centrale) et une pente un peu plus importante à droite qu'à gauche du maximum. Plusieurs études ont mis en évidence l'influence de facteurs visuels (longueur des mots) et lexicaux (fréquence, prédictibilité) sur le

niveau général des performances de reconnaissance. Il a été montré que les pentes des courbes OVP pouvaient, quant à elles, être influencées par la répartition de l'information lexicale dans le mot, l'acuité visuelle et l'encombrement, mais aussi les habitudes de lecture et la spécialisation hémisphérique (voir Chapitre 2, Section 2.3).

Tout d'abord, O'Regan et al. (1984), voir aussi [Holmes V. M. & O'Regan, 1987](#); [Brysbart et al., 1996](#); [Farid & Grainger, 1996](#)) ont montré que la répartition de l'information lexicale, c'est-à-dire le fait que les mots aient plutôt un début ou une fin ambiguë, pouvait modifier les pentes et la position de l'optimum des courbes OVP. L'ambiguïté dépend du nombre de mots de la langue partageant la même combinaison de lettres; plus une combinaison de lettres est fréquente plus l'ambiguïté sera élevée. O'Regan et al. (1984) ont montré lorsque les mots avaient une fin plus informative, moins ambiguë, que les courbes OVP correspondantes étaient plus symétriques, avec un maximum plus à droite que les courbes classiques. A partir notamment de ces résultats, Clark et O'Regan (1999, voir aussi [Stevens & Grainger, 2003](#)) ont proposé un modèle de la reconnaissance des mots basé presque exclusivement sur l'information lexicale. Dans leur modèle, le choix des lettres identifiées lors de la fixation (les deux lettres les plus proches du point de fixation et les deux lettres extrêmes) dépend, certes, de leur visibilité, mais c'est l'information lexicale apportée par ces quatre lettres qui détermine la probabilité de reconnaître le mot et qui est à l'origine de la forme de l'effet OVP : plus cette combinaison de lettres sera fréquente et plus son ambiguïté sera importante, plus la probabilité de reconnaître le mot cible sera faible. Bien que leur modèle parvienne à approcher correctement les données empiriques, que ce soit la position du maximum ou l'asymétrie des courbes, il semble peu probable que ce facteur soit le seul à déterminer la forme de l'effet OVP.

Plusieurs études ont en effet montré le rôle important de la visibilité des lettres, en mettant en évidence les effets de **l'acuité visuelle et de l'encombrement** sur le phénomène OVP. Ces expériences, réalisées par Nazir et ses collaborateurs, testaient les effets d'un changement des paramètres d'affichage sur les performances de reconnaissance dans une tâche d'identification perceptive (Nazir et al., [1992](#)) ou de décision lexicale (Nazir et al., [1998](#)). Ils ont montré que les pentes des courbes OVP étaient plus importantes lorsque l'on augmentait l'espacement inter-caractères et inversement, que l'effet OVP était atténué, voir complètement annulé lorsque l'on augmentait la taille des caractères proportionnellement à leur excentricité, tout au moins dans le cas des mots courts. Par ailleurs, Nazir et al. ([1991](#), voir aussi [McConkie et al., 1989](#)) ont proposé une hypothèse selon laquelle les performances

de reconnaissance de mots dépendraient uniquement de la quantité d'information visuelle disponible lors de la fixation. La forme des courbes OVP serait la résultante des variations de la visibilité des lettres en fonction de la position du regard dans le mot ; l'avantage d'une fixation à la position centrale s'expliquerait par le fait qu'elle permet d'extraire un nombre plus élevé de lettres dans le mot (qui par conséquent tombent dans l'empan visuel) et l'asymétrie serait due à l'avantage de l'hémichamp droit pour l'extraction des lettres dans des chaînes de caractères. Les auteurs ont implémenté leur hypothèse dans un modèle qui mesure la probabilité de reconnaissance d'un mot à partir de la multiplication des probabilités d'identification de chacune des lettres d'un mot, mesurées séparément dans une expérience comportementale. Les courbes ainsi prédites permettent d'approcher assez fidèlement les courbes OVP (position de l'optimum et asymétrie).

Les hypothèses soutenant un rôle prédominant de la visibilité des lettres ou des facteurs lexicaux ne sont toutefois pas incompatibles, et les expériences résumées ici vont plutôt dans le sens d'une contribution conjointe de tous ces facteurs à la forme de l'effet (voir aussi les modèles proposés par [Legge et al., 2001](#) et [Stevens & Grainger, 2003](#)). Ces facteurs seraient principalement responsables de la diminution asymétrique des performances lorsque l'on s'éloigne de part et d'autre de la position optimale de fixation, mais les habitudes de lecture et la spécialisation hémisphérique pourraient toutefois aussi influencer l'asymétrie des courbes.

5-1-2 – Devenir de l'effet OVP en vision périphérique

L'objectif de cette expérience était d'observer le devenir de l'effet OVP en vision périphérique, qui, jusque là, avait été étudié principalement lorsque le regard était aligné verticalement avec le mot. Seuls, [Battista & Kalloniatis, 2002](#)) avaient investigué le phénomène en vision périphérique (champ visuel inférieur ou supérieur), et leurs résultats étaient discutables du fait de la présence vraisemblablement d'effets de plafond dans leur expérience. Nous avons donc comparé l'effet OVP obtenu en vision normale (condition C pour « centrée »), à celui obtenu dans une condition expérimentale où les mots étaient présentés dans le champ visuel inférieur, 3° en-dessous du point de fixation (condition DV pour « décalée verticalement »), tout en gardant une taille de caractères constante.

L'intérêt d'une telle manipulation était double. Le premier résidait dans le fait qu'un effet de la condition de présentation (C ou DV) sur les pentes des courbes OVP permettrait de confirmer, d'une nouvelle manière, le rôle de l'acuité visuelle et de l'encombrement dans le phénomène OVP. En effet, si le phénomène OVP est bien principalement soumis à l'influence de l'acuité visuelle et de l'encombrement, on devrait observer un affaiblissement de l'effet dans le cas où le mot cible est présenté dans le champ visuel inférieur, car, à taille de caractères équivalente, l'excentricité absolue (ou excentricité 2D) des lettres d'un mot augmente moins rapidement lorsque le mot est décalé verticalement par rapport au point de fixation (cf. Figure 5.1). Puisque l'acuité visuelle diminue de manière quasi-linéaire lorsque l'excentricité rétinienne augmente ([Wertheim, 1980](#)), et que l'effet de l'encombrement augmente avec l'excentricité 2D ([Bouma, 1970](#); [Pelli et al., 2007](#)), le décalage horizontal du mot, mesuré en nombre de lettres, devrait avoir un effet moins important sur la visibilité des lettres dans le cas où les mots sont présentés en-dessous du point de fixation. De plus, contrairement aux expériences proposées par Nazir et collaborateurs, ce paradigme possède l'avantage de modifier la configuration visuelle sans changer la forme habituelle du mot. Les effets observés ici ne seront donc pas attribuables à un changement de la forme des mots comme cela pouvait éventuellement être le cas dans l'expérience « papillon » de Nazir et al. ([1998](#)) ou bien encore dans l'expérience de Nazir et al. ([1992](#)) où l'espacement entre les lettres des mots était manipulé.

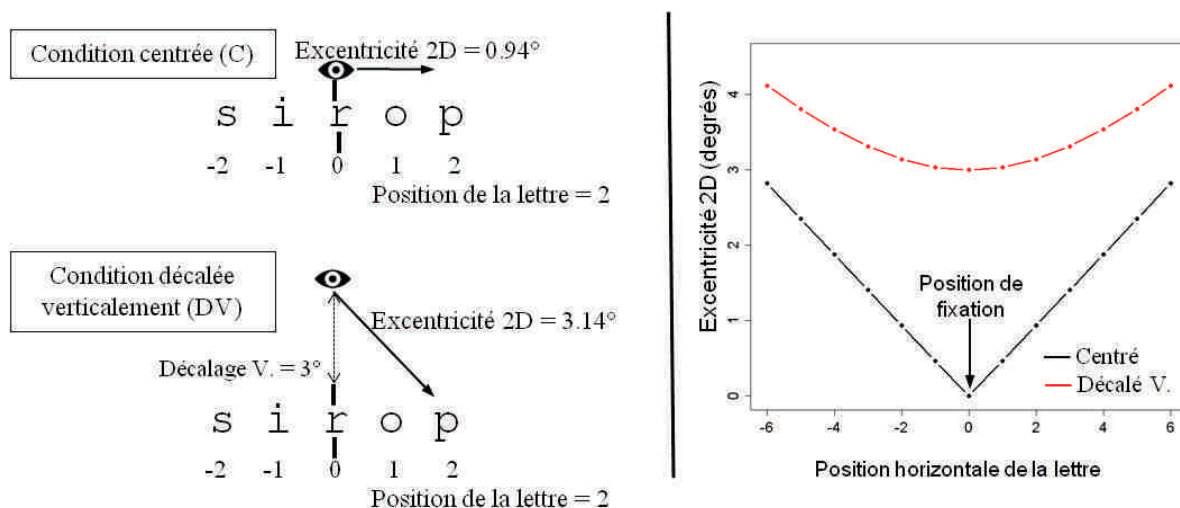


Figure 5.1 : Exemples du paradigme utilisé dans cette expérience. Les mots étaient soit alignés verticalement avec le point de fixation (condition centrée), soit présentés 3° en dessous (condition décalée verticalement). Le graphique de droite montre que, lorsque le décalage horizontal de la position de la lettre fixée dans un mot (exprimé en lettres) augmente, son excentricité 2D augmente moins rapidement dans la condition DV (en rouge) que dans la condition C (en noir).

Le second intérêt de la présente étude, chez des sujets sains, était d'apporter de nouveaux éléments de réponse à la question d'un avantage théorique pour une position de PRL chez les patients porteurs d'un scotome maculaire. En effet, même si aucune corrélation n'a été mise en évidence entre la position de la PRL de fixation et la vitesse de lecture chez les patients atteints de DMLA ([Fletcher et al., 1999](#); [Crossland et al., 2005a](#)), plusieurs arguments suggèrent qu'une PRL située en-dessous du scotome est plus favorable pour la reconnaissance de mots. Tout d'abord, plusieurs auteurs ont suggéré que placer son scotome au dessus du mot à identifier permettrait d'en avoir une vision globale ([Déruaz et al., 2002](#)), et surtout, éviterait de masquer la partie du texte n'ayant pas encore été lue avec le scotome. De plus, les expériences réalisées chez des sujets sains, forcés à lire avec leur vision périphérique, montrent que, dans la plupart des cas, ces derniers choisissent spontanément une PRL inférieure (communication personnelle, J.B. Bernard), et que lorsque la position de la PRL est imposée, la vitesse de lecture est meilleure pour une PRL située en-dessous qu'au dessus du point de fixation ([Nilsson et al., 2003](#)). Un autre argument théorique proposé par Petre et al. ([2000](#)), et qui est en lien direct avec notre étude, est qu'une position de fixation située au dessus ou en-dessous du mot permettrait de diminuer l'excentricité absolue des lettres les plus extrêmes et ainsi de réduire les effets liés à la diminution de l'acuité visuelle et à l'augmentation de l'encombrement. Ajoutons que les propriétés de l'encombrement décrites par Pelli et al. ([2007](#)) prédisent aussi une meilleure visibilité des lettres lorsque le mot est décalé verticalement plutôt qu'horizontalement par rapport au point de fixation (à excentricité égale). Les auteurs ont mesuré la taille de l'espace critique, c'est-à-dire de la plus petite zone autour d'une lettre pour qu'elle ne soit pas soumise à l'encombrement. Ils ont montré que cette zone critique avait une forme d'ellipse dont la taille augmentait avec l'excentricité, mais surtout que l'ellipse était orientée vers le point de fixation. Par conséquent, à excentricité égale, l'effet de l'encombrement devrait être moins néfaste lorsque le mot est présenté en-dessous qu'à côté du point de fixation car les ellipses devraient moins recouvrir les lettres adjacentes du mot (cf. Figure 5.2). Enfin, si, comme nous le prédisons, l'effet OVP est moins marqué lorsque le mot est en dessous du point de fixation, cela signifie qu'il n'est pas aussi important d'aligner son regard avec le centre des mots en vision périphérique qu'en vision centrale. Cette question est critique lorsque l'on sait que les patients porteurs d'un scotome maculaire présentent des difficultés à programmer des saccades précises en direction d'une cible périphérique ([White & Bedell, 1990](#); [Whittaker Stephen G. et al., 1991](#)).

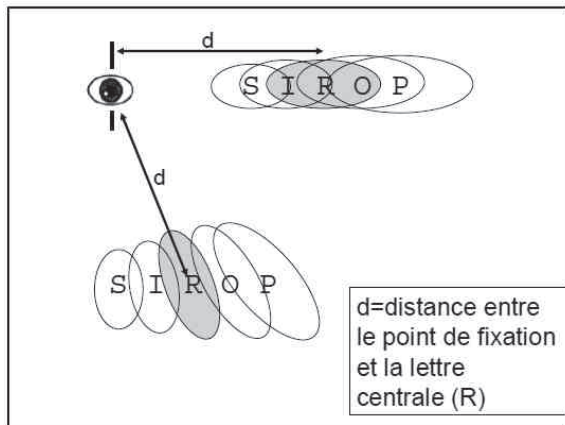


Figure 5.2 : Représentation schématique des zones d'espace critique pour un mot décalé horizontalement et verticalement par rapport au point de fixation. L'espace critique est une zone elliptique dont la surface augmente avec l'excentricité de la cible et dont le grand axe est orienté vers le point de fixation. A excentricité (d) égale, l'effet de l'encombrement sur la lettre 'R' devrait être moins néfaste lorsque le mot est en dessous du point de fixation car l'ellipse d'espace critique (en gris) contient peu, voire aucun autre caractère.

En résumé, notre expérience consistait à étudier les effets du décalage horizontal de la position initiale de fixation dans un mot sur les performances de reconnaissance chez des participants sains, d'une part en vision centrale (condition C) et d'autre part dans le champ visuel inférieur (condition DV). Les mouvements des yeux des participants étaient mesurés grâce à un oculomètre afin de contrôler, à tout moment, leur position de fixation par rapport au centre du mot cible. Si l'acuité visuelle et/ou l'encombrement sont bien des facteurs limitant la reconnaissance de mots, on devrait observer une diminution significative de la pente des courbes OVP dans la condition 'décalée verticalement' par rapport à la condition 'centrée'.

5-2 – METHODE

5-2-1 – Participants

Neuf individus naïfs ont participé à l'expérience en échange d'une compensation financière de 30 euros. Tous étaient des étudiants de l'Université d'Aix-Marseille (âge compris entre 18 et 25 ans), étaient de langue maternelle française et avaient une vision normale non corrigée.

5-2-2 – Matériel

Un total de 720 mots de 5 et 7 lettres ont été présentés aux participants (cf. liste en Annexe 3). Leur fréquence lexicale moyenne, estimée grâce à la base de données « Lexique 3 » (www.lexique.org; voir [New et al., 2001](#)), était de 96 occurrences par million (opm) pour les mots de 5 lettres et de 40 opm pour les mots de 7 lettres. Pour chaque catégorie de longueur, la moitié des mots était de basse fréquence (< 15 opm et < 10 opm pour les mots de 5 et 7 lettres respectivement) et l'autre moitié de haute fréquence (> 20 opm et > 15 opm pour les mots de 5 et 7 lettres respectivement). Les stimuli étaient répartis de façon aléatoire dans 10 listes correspondant aux 10 blocs d'essais et comprenant chacune 76 mots : 72 mots cibles (18 de chaque catégorie de longueur et de fréquence) et 4 mots de fréquence moyenne, placés au début de la liste et permettant aux participants de se préparer au bloc d'essais. Deux listes supplémentaires, comprenant 76 mots de fréquence moyenne, ont été construites pour servir de blocs d'entraînement avant chaque condition de décalage horizontal.

5-2-3 – Procédure

Une session expérimentale durait environ quatre heures. Les participants étaient installés devant un écran d'ordinateur situé à une distance de 85 cm, la tête maintenue stable grâce à un support dentaire. Ils avaient à leur disposition un bouton de validation pour le calibrage et un clavier sur lequel ils devaient taper les mots (ou lettres) qu'ils avaient vu durant les essais.

Chaque bloc d'essais était précédé d'une phase de calibrage permettant de vérifier la correspondance entre l'orientation de l'œil mesurée par l'oculomètre et la position de fixation sur l'écran. Un essai se déroulait de la façon suivante :

(1) affichage du numéro d'essai dans la partie supérieure de l'écran pendant 800 ms.

(2) affichage de deux barres verticales alignées au centre de l'écran, pendant une durée minimale de 200 ms. Les participants avaient pour consigne de fixer l'espace entre ces deux barres jusqu'à l'apparition du mot.

(3) disparition des barres de fixation et affichage du mot cible à une position horizontale variable par rapport au point de fixation, lorsque la fixation était considérée comme valide par l'ordinateur connecté à l'oculomètre (c'est-à-dire comprise dans une région de $0,27^\circ$ sur l'axe horizontal et 1° sur l'axe vertical autour du point central). Dans la condition contrôle (C), le mot était présenté pendant 34 ms sur l'axe horizontal central, dans la condition décalé vertical (DV), il était présenté pendant 148 ms, 3° en dessous de l'axe central.

(4) disparition du mot et apparition d'un masque composé d'une série de 9 dièses jusqu'à ce que les sujets appuient sur la touche « Entrée » du clavier

(5) les participants tapaient le mot qu'ils avaient identifié sur le clavier et, lorsque le mot n'avait pas été identifié, ils pouvaient remplacer les lettres non reconnues par des tirets. Une fois la réponse tapée, ils appuyaient à nouveau sur la touche « Entrée » pour valider leur réponse et déclencher un nouvel essai. A la fin d'un bloc, le nombre de mots correctement reconnus était affiché sur l'écran, à titre indicatif.

Concernant le choix des paramètres de présentation, il est important de noter que ce paradigme nécessitait de garder la même taille de caractères dans les deux conditions de présentation verticale, de sorte que les valeurs de décalage horizontal soient comparables d'une condition à l'autre. Nous avons donc choisi une taille de lettre de $0,33^\circ$ pour les deux conditions (police Courier), et compensé l'augmentation de la distance verticale de présentation par une augmentation du temps d'affichage des mots dans la condition DV. Même s'il a été montré que le temps de présentation pouvait influencer le niveau général des performances, les résultats de Brysbaert et al. (1996) ne montrent aucun changement dans les pentes de l'effet OVP lorsque l'on augmente les durées de présentation, à condition d'éviter tout effet de plancher ou de plafond. Les deux durées de présentation ont été choisies à partir des probabilités de reconnaissance de mots de 7 lettres obtenues dans une expérience préliminaire basée sur deux participants. Des durées de 34 et 148 ms permettaient d'obtenir environ 50% de réussite dans chacune des conditions de présentation (pour un décalage horizontal de 0°) et d'éviter ainsi tout effet de plafond ou de plancher. Notons aussi que la

condition C était toujours passée avant la condition DV, car considérée comme étant plus difficile et nécessitant plus d'entraînement.

5-2-4 – Plan expérimental et carré latin

Quatre facteurs étaient manipulés dans l'expérience :

- le décalage horizontal de la barre de fixation par rapport au centre du mot cible (en nombre de lettres), qui avait 9 niveaux, différents pour chaque longueur de mots, et exprimés en nombre de lettres. Ceci permettait d'avoir des positions de fixations équivalentes entre les deux longueurs de mots (5 positions de fixations au sein du mot et 4 positions au-delà des limites du mot, cf. Figure 5.3). Les valeurs de décalage étaient de -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 et 4 pour les mots de 5 lettres et -6, -4.5, -3, -1.5, 0, 1.5, 3, 4.5 et 6 pour les mots de 7 lettres. Les valeurs négatives, correspondaient aux cas où la barre était à gauche du centre et, inversement, les valeurs positives, aux cas où la barre était à droite du centre du mot.

- le décalage vertical, qui était de 0° dans les cinq premiers blocs expérimentaux et de 3° dans les cinq derniers.

- la longueur des mots (5 ou 7 lettres).

- la catégorie de fréquence lexicale (haute ou basse).

Le plan dit en « carré latin » consiste à présenter chaque mot une seule fois et dans des conditions de présentation différentes pour chaque participant. Dans notre plan expérimental, un mot donné était toujours vu dans le même bloc d'essais et dans la même condition de décalage vertical, mais, par exemple, il était présenté avec un décalage horizontal de 0 lettres pour le sujet 1, de 1 lettre pour le sujet 2, etc.

Décalage horizontal de la lettre centrale

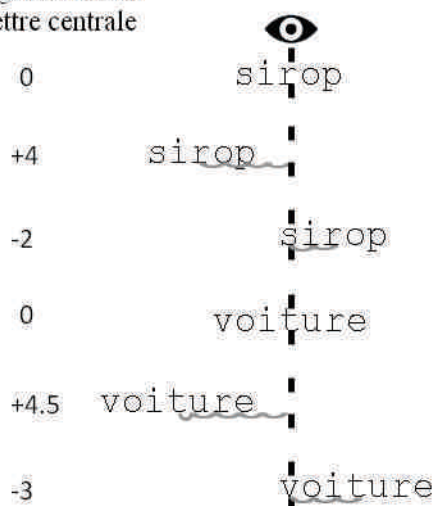


Figure 5.3 : Exemples de trios conditions de décalage horizontal pour les mots de 5 (en haut) et 7 lettres (en bas). Les deux barres verticales indiquent la position de fixation. Lorsque la valeur du décalage horizontal est négative (-2, -3), la fixation est à gauche du centre du mot et inversement, lorsque la valeur de décalage est positive (+4, +4,5), la position de fixation est à droite du centre. Les valeurs du décalage horizontal étaient les mêmes pour la condition Centrée et la condition Décalée verticalement mais étaient différentes pour les mots de 5 (-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, and 4) et 7 lettres (6, -4.5, -3, -1.5, 0, 1.5, 3, 4.5 and 6).

5-2-5 – Appareillage

L'oculomètre utilisé dans cette expérience était un Dual-Purkinje-Image Eye Tracker de 5ème génération (Ward Electro-Optics, Inc), qui mesure les mouvements de l'œil droit avec une précision de 10 minutes d'arc ([Cornsweet & Crane, 1973](#)). L'appareil était relié à deux ordinateurs; le premier était utilisé pour analyser la position de l'œil en temps réel ([Van Rensbergen & De Troy, 1993](#)) et le deuxième permettait de contrôler l'affichage des stimuli et enregistrer les réponses des participants. La connexion entre les deux ordinateurs permettait d'afficher les stimuli une fois seulement que l'œil du participant était à la bonne position, c'est-à-dire dans une région de 0,27° de largeur et 1° de hauteur autour de la barre de fixation.

5-2-6 – Sélection des données

Dans un premier temps, les mots comportant des fautes de frappes évidentes ou des oublis d'accent ont été corrigés et considérés comme des réponses correctes. Pour l'analyse statistique, nous avons ensuite sélectionné uniquement les essais où (1) le mot était apparu durant une fixation et non pas une saccade, (2) les participants n'avaient pas effectué de saccade ou appuyé sur la touche « Entrée » avant l'apparition du masque, et (3) il n'y avait pas eu de clignement des yeux durant la présentation du mot. Enfin, pour nous assurer que les contraintes d'excentricité verticale étaient bien respectées, nous avons éliminé les cas où la position verticale du regard était trop éloignée de la barre de fixation (plus de 1,5 écart type de la moyenne). Au final, l'analyse a été menée sur 3901 essais, soit 73% des données initiales.

5-2-7 – Méthodes d'analyse des données

5-2-7-1 – Choix des variables

Les analyses classiques de l'effet OVP représentent généralement la proportion de réponses correctes en fonction de la condition horizontale de présentation du mot. Elles ne donnent donc qu'une valeur approximative du décalage horizontal, d'une part parce que la position de l'œil au moment de la présentation du mot n'était pas contrôlée, mais surtout parce qu'elles utilisent une variable discrète pour exprimer le décalage horizontal, avec une précision d'une lettre ou dans le meilleur cas, une demi-lettre. Pour améliorer la précision de nos résultats, nous avons choisi d'utiliser la position réelle de l'œil donnée par l'oculomètre plutôt que la valeur de décalage théorique (-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 et 4 pour les mots de 5 lettres, par exemple). Notre variable de décalage horizontal était donc une variable continue allant de -7,5 à 7,5 lettres.

5-2-7-2 – Représentation des données brutes

Notre analyse comportait deux étapes ; une représentation des données brutes et un modèle statistique de régression linéaire, l'une et l'autre effectuées avec le logiciel R ([R Development Core Team, 2008](#)). Pour tracer les courbes OVP représentant la proportion de réponses correctes en fonction du décalage horizontal (cf. Figure 5.5) nous avons utilisé la fonction *LOWESS* (pour *LOcally WEighted Scatterplot Smoothing*, [Cleveland, 1981](#)), une méthode de régression qui permet d'évaluer des probabilités moyennes locales pondérées pour chaque valeur de décalage horizontal (x). Dans cette fonction, l'intervalle sur lequel est fait le moyennage (ou « *bandwidth* ») est variable pour chaque valeur de x , il est ajusté en fonction de la dispersion des points voisins : un point situé en bord de distribution, avec des voisins éloignés, sera estimé avec une « *bandwidth* » plus large et aura une influence moins importante sur la forme de la distribution.

5-2-7-3 – Modèle de régression linéaire : GLMM

Pour quantifier l'effet des variables manipulées sur la proportion de réponses correctes nous avons utilisé un modèle de régression linéaire généralisé à effets mixtes (ou GLMM pour *Generalized Linear Mixed effects Model*, [Bolker et al., 2009](#); [Zuur et al., 2009](#)). Les modèles de régression linéaires classiques permettent d'établir une relation affine (de type

$y=ax+b$) entre une variable dépendante y et un facteur explicatif ou prédicteur, x . Si l'on incorpore plusieurs prédicteurs au modèle, il sera de la forme $y = b + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k$. La particularité d'un modèle à effets mixtes est qu'il permet de faire la différence entre les effets dits « fixes » qui sont dus à des variables contrôlées par l'expérimentateur, et les effets dits « aléatoires » qui peuvent varier entre les individus. Si l'on rentre le numéro du participant (ici, de 1 à 9) comme facteur aléatoire, le modèle va prendre en compte la corrélation des mesures provenant d'un même participant et ne pas surestimer la dispersion des données si, par exemple, un participant a un niveau de performances global supérieur aux autres. Un autre avantage de ce type de modèle est qu'il fonctionne même s'il y a des données manquantes, c'est-à-dire si le nombre d'observations est différent d'une condition à l'autre ou d'un participant à l'autre. Enfin, le terme « généralisé » désigne un type de régression qui permet de prédire la proportion d'une modalité d'une variable catégorielle binaire (ici de type Correct/Incorrect) en la transformant par une fonction mathématique afin que sa relation avec les prédicteurs soit bien linéaire. En effet, la valeur d'une proportion (p) est limitée à l'intervalle $[0;1]$. Elle ne varie donc pas de manière linéaire en fonction d'un prédicteur x (par exemple si $p=75\%$ pour $x=1$, on n'aura pas $p=150\%$ pour $x=2$), mais en suivant une fonction logistique de la forme : $p = 1/(1+\exp^{-x})$ (voir Figure 5.4). Pour que cette relation soit linéaire, le modèle transforme la proportion p en une variable y , en utilisant la fonction inverse de la fonction logistique, la fonction logit, qui s'écrit $y = \log(p/(1-p))$. Le GLMM nous donne donc les paramètres estimés de la relation linéaire entre le logit de la proportion de réponses correctes (y) et les variables entrées comme prédicteurs (x). Les valeurs prédites devront être retransformées par la formule $p = 1/(1+\exp^{-y})$ pour obtenir les valeurs de proportion (p) correspondantes. Pour réaliser ce modèle nous avons utilisé la fonction `lmer` du package NLME ([Pinheiro & Bates, 2000](#)) compris dans R.

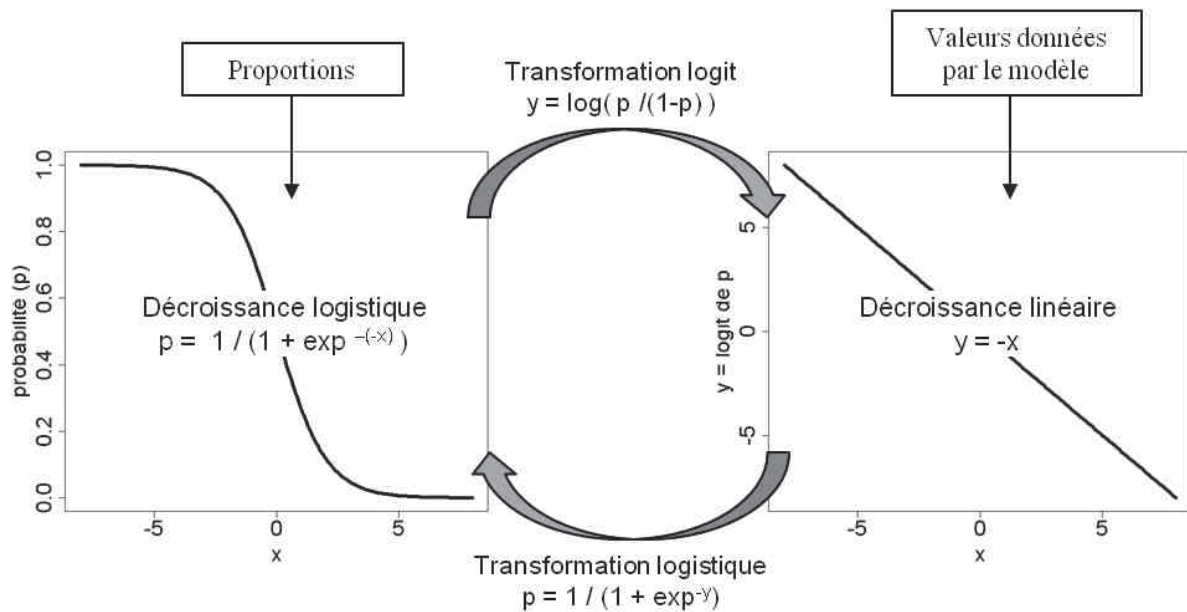


Figure 5.4 : Représentation graphique d’une fonction logistique décroissante (à gauche) et de la fonction linéaire correspondante (à droite) après transformation par la fonction logit. Les valeurs ‘y’ données par le modèle statistiques doivent être transformées en proportions avec la fonction logistique : $p = 1/(1+\exp^{-y})$.

Nous avons entré comme facteur aléatoire le numéro du sujet, et en facteurs fixes :

- la valeur absolue du décalage horizontal (variable continue, de 0 à 6 lettres)
- le côté de fixation par rapport au centre du mot (variable catégorielle, droit ou gauche), avec les valeurs de décalage négatives correspondant au côté gauche et les valeurs positives au côté droit.
- le décalage vertical (variable catégorielle, 0° ou 3°)
- la longueur des mots (variable catégorielle, 5 ou 7 lettres)
- la fréquence des mots (variable catégorielle, basse ou haute)
- le numéro du bloc d’essais (variable discrète, de 1 à 10)

Nous avons aussi inclus les interactions entre le décalage vertical et le numéro du bloc, ainsi que les interactions entre la distance horizontale et les quatre facteurs suivants : le côté de fixation, le décalage vertical, la fréquence des mots et le numéro du bloc d’essais.

5-3 – RESULTATS

5-3-1 – Courbes OVP

La Figure 5.5 représente la proportion de réponses correctes en fonction de la position de fixation ajustée grâce à la fonction LOWESS, séparément pour les mots de 5 (à gauche) et 7 lettres (à droite), pour la condition centrée (en noir) et la condition décalée verticalement (pointillés gris). Les graphiques montrent la présence d'un effet OVP, c'est-à-dire des courbes en forme de U inversé, avec un maximum légèrement à gauche de la position centrale ; les valeurs de position horizontale correspondant à la probabilité de reconnaissance maximale sont de -0,85 et -0,87 pour les mots de 5 lettres et de -1,14 et -1,42 pour les mots de 7 lettres, dans les conditions C et DV respectivement. La principale observation que l'on peut faire à partir de ces courbes descriptives, et qui devrait être confirmée par le modèle statistique, est que les pentes paraissent légèrement plus importantes dans la condition C que dans la condition DV. Il est peu probable que cette différence soit due à un effet de plafond puisque le niveau de performances maximal est à peu près le même dans les deux conditions de décalage vertical et ne dépasse jamais 50% de bonnes réponses.

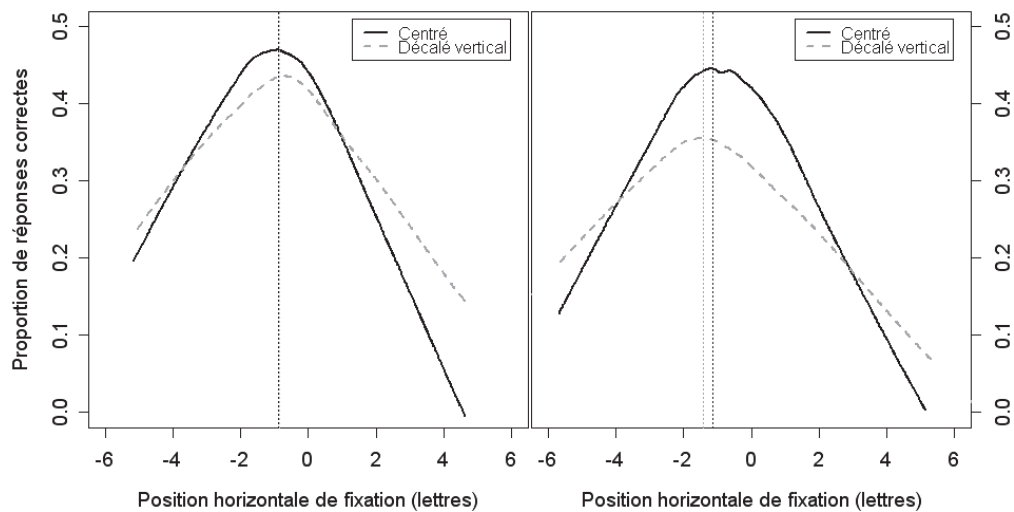


Figure 5.5 : Ajustement de la proportion de réponses correctes en fonction du décalage horizontal, séparément pour les mots de 5 lettres (à gauche) et les mots de 7 lettres (à droite). La courbe noire correspond à la condition Centrée et la courbe grise à la condition Décalée Verticalement. Les courbes ont l'allure caractéristique du phénomène OVP, mais l'effet parait moins marqué dans la condition DV que dans la condition C.

5-3-2 – Analyse statistique

5-3-2-1 – Facteurs catégoriels

Les effets fixes obtenus grâce au GLMM sont présentés dans le Tableau 5.1 ainsi que sur la Figure 5.6. Les courbes de la Figure 5.6 représentent les valeurs estimées par le modèle, en unités logit (Figure 5.6a, fonction linéaire) et en proportion (Figure 5.6b, fonction logistique), en fonction du décalage horizontal. La première colonne du Tableau 5.1 indique le coefficient estimé de l'effet de chaque facteur, exprimé en unités logit (y). Le coefficient de la première ligne représente la valeur moyenne prédite lorsque tous les facteurs sont à leur niveau de référence (y_0 = ordonnée à l'origine). Les valeurs de référence choisies étaient : distance horizontale = 0 lettres, décalage vertical = 0°, côté de fixation = gauche, longueur des mots = 5 lettres, fréquence = basse et numéro de bloc = 0. Le coefficient à l'origine est de -0,204 (en unités logit) ce qui correspond à une proportion (p_0) de 0,449 ($1/(1+\exp^{-(-0,204)})$) (cf. Figure 5.5, valeur de la courbe noire quand abscisse = 0). Les autres valeurs de la première colonne indiquent le coefficient estimé de chaque facteur fixe ainsi que de leurs interactions.

	Coefficient	Ecart-type	z	P	Correspondance en proportions
Ordonnée à l'origine	-0.204	0.313	-0.654	0.513	0.449
Distance horizontale (lettres)	-0.427	0.076	-5.622	1.89 ⁻⁰⁸ ***	-
Côté de fixation (Droit)	-0.355	0.145	-2.443	0.015 *	0.364
Décalage vertical (3°)	-0.991	0.432	-2.296	0.022 *	0.232
Longueur des mots (7)	-0.166	0.081	-2.053	0.04 *	0.408
Fréquence des mots (Haute)	0.867	0.144	6.032	1.62 ⁻⁰⁹ ***	0.66
Numéro du bloc	0.151	0.056	2.684	7.28 ⁻⁰³ **	+
Distance H. : Côté de fix (Droit)	-0.247	0.055	-4.489	7.15 ⁻⁰⁶ ***	-
Distance H. : Décalage V. (3°)	0.26	0.103	2.528	0.011 *	-
Distance H. : Fréquence (Haute)	0.015	0.052	0.295	0.768	-
Distance H. : Num. du bloc	-0.01	0.018	-0.549	0.583	-
Décalage V. (3°) : Num. du bloc	-0.031	0.055	-0.558	0.577	+

Tableau 5.1 : Résultats obtenus avec le GLMM pour les effets fixes. Les coefficients et écarts-types sont donnés en unités logit et doivent être transformés en proportions grâce à la fonction logistique. La dernière colonne du tableau donne la proportion de réponses correctes correspondant aux différents niveaux de chaque facteur catégoriel et, pour les facteurs continus, le signe du coefficient directeur de la pente. Le signe « - » correspond à une courbe décroissante et le signe « + », à une courbe croissante.

Les interactions sont représentées par les deux points « : », et les astérisques indiquent le niveau de significativité : * P < 0,05 ; ** P < 0,01 ; *** P < 0,001

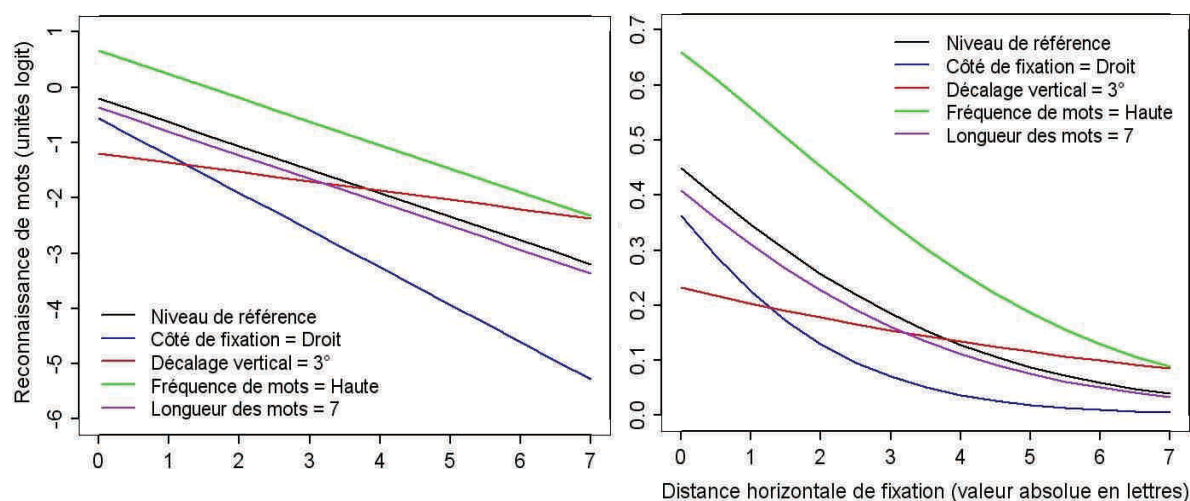


Figure 5.6 : Prédications du modèle pour la proportion de réponses correctes en fonction de la distance horizontale, en unités logit (en haut) et en proportion (en bas). La courbe noire correspond au niveau de référence, c'est-à-dire lorsque la distance horizontale est à 0 et les facteurs catégoriels sont à leur niveau de référence (Côté de fixation=Gauche, Décalage vertical=0°, Fréquence=Basse et Longueur des mots=5l). Les courbes colorées correspondent au deuxième niveau de chaque facteur catégoriel. Si l'interaction entre la distance horizontale et un facteur catégoriel est significative, la courbe correspondant à ce facteur aura une pente différente de celle de la courbe noire (par exemple, la courbe rouge représentant l'effet du facteur Décalage vertical = 3°

5-3-2-2 – Facteurs continus et interactions

Le coefficient d'un facteur continu représente la pente de la relation entre la variable dépendante et ce prédicteur. En unités logit, la relation est linéaire et le coefficient y_k correspond au coefficient directeur de la droite (cf. Figure 5.6a), mais lorsque les valeurs sont transformées en proportions, la pente des courbes n'est plus linéaire. Pour simplifier l'interprétation des résultats, nous avons simplement indiqué dans la dernière colonne du Tableau 5.1, un signe « + » ou « - » selon le sens de la pente des courbes correspondant à un facteur donné ; le « + » correspondant à une courbe croissante et le « - », à une courbe décroissante. Les deux facteurs continus présentés ici ont un effet significatif. Le décalage horizontal a un effet négatif (-0,427), ce qui signifie que les performances diminuent lorsque l'excentricité horizontale augmente (cf. Figure 5.6b, courbe noire), et, au contraire, le numéro du bloc a un coefficient positif (0,151), ce qui indique une augmentation du niveau général des performances tout au long de l'expérience. La Figure 5.7 représente les valeurs estimées de la proportion de réponses correctes en fonction du numéro de bloc lorsque le regard fixe le centre des mots (décalage horizontal = 0) et séparément pour chaque facteur catégoriel. Le fait que le facteur bloc n'interagisse avec aucun des autres facteurs (cf. paragraphe suivant) explique pourquoi toutes les courbes ont la même pente.

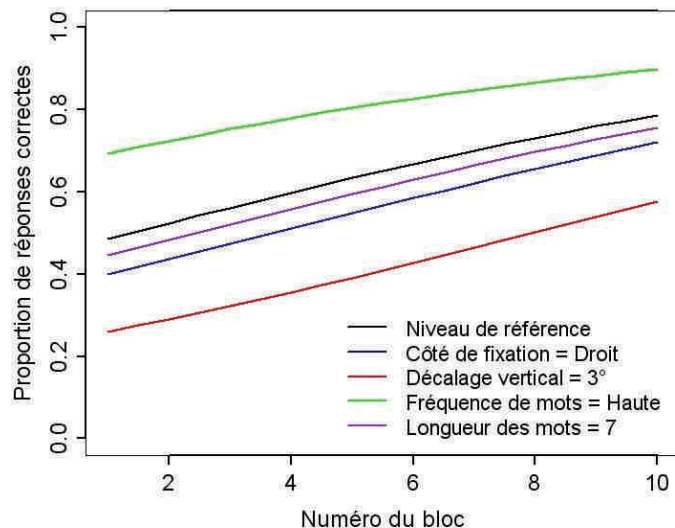


Figure 5.7 : Prédications du modèle pour la proportion de réponses correctes en fonction du numéro du bloc. Les courbes croissantes correspondent à une amélioration des performances tout au long de l'expérience. Le fait que le facteur 'bloc' n'interagisse avec aucun des facteurs catégoriels fait que les courbes correspondant à chaque facteur sont parallèles à la courbe de référence (en noir).

Une interaction significative entre un facteur continu et un facteur catégoriel signifie que la pente des courbes représentant la proportion de réponses correctes en fonction du facteur continu change selon le niveau du facteur catégoriel. La valeur de la pente correspondant au deuxième niveau du facteur catégoriel s'obtient en ajoutant le coefficient de l'interaction au coefficient du facteur continu. La première interaction significative est l'interaction entre la distance horizontale et le côté de fixation, avec un coefficient négatif (-0,247), ce qui montre que la pente des courbes est moins importante lorsque le regard fixe à gauche ($y=-0,427$) qu'à droite ($y=-0,427-0,247=-0,674$) du centre du mot (cf. Figure 5.6, courbe bleue). La deuxième interaction significative est celle qui nous intéresse en particulier, c'est-à-dire, l'interaction entre la distance horizontale et le décalage vertical. Le modèle montre un effet OVP plus prononcé, c'est-à-dire des pentes plus importantes dans la condition centrée ($y=0,427$) que dans la condition décalée verticalement ($\text{logit} = -0,427+0,260 = -0,167$) (cf. Figure 5.6, courbe rouge). Enfin, l'absence d'interaction entre la distance horizontale et le numéro du bloc (cf. Figure 5.7) ou la fréquence des mots (cf. Figure 5.6, courbe verte) indique que même si ces deux facteurs ont un effet sur le niveau général des performances, ils n'affectent pas la forme du phénomène OVP.

5-4 – DISCUSSION

Cette expérience avait pour but d'étudier le rôle des facteurs visuels dans la reconnaissance de mots en vision centrale et en vision excentrée en s'appuyant sur les propriétés du phénomène OVP. Le paradigme utilisé, qui consistait à présenter les mots soit sur le même axe horizontal (condition Centrée), soit 3° en-dessous du point de fixation (condition Décalée Verticalement), présentait l'avantage de pouvoir faire varier les caractéristiques visuelles du stimulus sans en changer la forme globale. L'observation principale ressortant de cette étude est la présence d'un effet OVP dans les deux conditions, mais qui s'avère affaibli, avec des pentes moins importantes, lorsque le mot est décalé verticalement. Ce nouveau résultat supporte l'hypothèse d'un rôle majeur des facteurs visuels dans la reconnaissance de mots, mais il apporte aussi des arguments théoriques en faveur du choix d'une PRL verticale pour la lecture chez les patients porteurs d'un scotome.

5-4-1 – Un rôle majeur des facteurs visuels

Comme nous l'avons expliqué précédemment, les connaissances actuelles du phénomène OVP suggèrent qu'il serait dû à l'influence conjuguée de l'acuité visuelle, de l'encombrement, des habitudes de lecture et de la spécialisation hémisphérique, mais, selon certains auteurs ([McConkie et al., 1988](#); [Nazir et al., 1991](#)), ce seraient les facteurs visuels, c'est-à-dire l'acuité visuelle et l'encombrement, qui joueraient un rôle prépondérant dans la forme générale de l'effet. Un des arguments en faveur de cette hypothèse est qu'il est possible d'approcher la forme des courbes OVP à partir uniquement des performances de reconnaissance de lettres présentées dans des chaînes de caractères ([Nazir et al., 1991](#)). Deux principales expériences ont été mises en place par Nazir et collaborateurs pour tenter de confirmer cette hypothèse, la première consistant à augmenter l'espace inter-caractères ([Nazir et al., 1992](#)) et la deuxième magnifiant la taille des caractères en fonction de leur distance par rapport au point de fixation (*mots papillons* ; [Nazir et al., 1998](#)). Si ces paradigmes permettent, en effet, de modifier les caractéristiques visuelles des stimuli, ils présentent tous deux l'inconvénient de modifier aussi la forme générale des mots, ce qui peut poser des problèmes liés au phénomène d'apprentissage perceptif. Dans notre expérience nous avons tenté de palier ce problème en conservant la forme usuelle des mots mais en les affichant dans la partie inférieure du champ visuel. Lorsque les mots sont décalés verticalement, la taille des lettres, ainsi que l'espacement inter-caractères sont conservés, mais la façon dont la visibilité

des lettres diminue en fonction du décalage horizontal est différente. En effet, comme le montre la Figure 5.1b, la courbe représentant l'augmentation de la distance 2D des lettres en fonction de leur décalage horizontal est plus aplatie dans la condition décalée verticalement, donc, même si les lettres sont, dans l'ensemble, plus difficiles à identifier, l'effet du décalage horizontal sur les performances devrait être moins néfaste. Selon l'hypothèse visuelle soutenue par McConkie et al (1989) et Nazir et al. (1991), ceci devrait avoir pour effet de diminuer aussi les pentes des courbes OVP.

Notons que ce type de paradigme avait déjà été utilisé par Battista et Kalloniatis (2002) qui avaient obtenu, contrairement à nos prédictions, des pentes plus importantes lorsque les mots étaient présentés au-dessus ou en dessous du point de fixation. Nous avons toutefois choisi de réexaminer l'effet OVP dans de telles conditions. En effet, les auteurs ne faisaient que mentionner ce résultat et ne tentaient pas d'y apporter une explication; leur travail se concentrait plus particulièrement sur l'effet du décalage vertical sur l'asymétrie des courbes OVP. D'autre part, dans leur étude, l'augmentation de l'excentricité verticale n'était compensée ni par l'augmentation de la taille des caractères (fixée à $0,46^\circ$), ni par l'allongement des durées de présentation (100ms) et le niveau de performance global était très élevé dans la condition centrale (allant même jusqu'à 100% de réponses correctes lorsque le regard était aligné avec le centre du mot). Il est donc très probable que les courbes plus aplaties obtenues par Battista et Kalloniatis dans la condition centrée étaient le résultat d'un effet de plafond. Dans notre expérience, la taille des caractères était aussi la même pour les deux conditions de décalage vertical ($0,33^\circ$), mais l'excentricité était compensée par l'augmentation de la durée de présentation de sorte que les performances globales soient comparables mais surtout qu'elles soient toujours en dessous du maximum (entre 40% et 50% de réponses correctes en moyenne pour le maximum des courbes OVP).

Dans notre expérience, nous avons donc choisi de conserver la forme habituelle des mots et de garder la même taille de caractères dans les deux conditions de décalage vertical. Nos données montrent, pour tous les participants et pour toutes les conditions de longueur et de fréquence de mots, un effet OVP plus faible dans la condition décalée verticalement que dans la condition centrée, ce qui est en accord avec l'hypothèse selon laquelle la reconnaissance des mots est en partie contrainte par les propriétés de l'acuité visuelle et l'encombrement. En effet, la diminution des pentes des courbes OVP dans l'hémichamp visuel inférieur pourrait s'expliquer par le fait que l'excentricité 2D des lettres du mot augmente moins rapidement lorsque le décalage horizontal (mesuré en nombre de lettres) augmente,

et/ou par le fait que les ellipses d'encombrement sont plus verticales lorsque les mots sont présentés en dessous du point de fixation ([Pelli et al., 2007](#)). Dans les deux cas, cela favoriserait la visibilité des lettres les plus excentrées et expliquerait pourquoi un alignement du regard avec la position centrale du mot n'est plus aussi avantageux lorsque le mot est décalé verticalement.

5-4-2 – Autres facteurs pouvant expliquer l'effet observé

L'hypothèse d'un rôle important des facteurs visuels dans la reconnaissance des mots n'exclut cependant pas la possibilité que d'autres types de facteurs puissent aussi influencer le niveau général des performances ou même la forme de l'effet OVP.

5-4-2-1 – Facteurs lexicaux : fréquence lexicale et répartition de l'information

Parallèlement à l'hypothèse visuelle, Clark et O'Regan ([1999](#)) ont proposé que la forme de l'effet OVP soit principalement due aux contraintes lexicales, c'est-à-dire au fait que les lettres extraites à partir d'une fixation au centre d'un mot (i.e. celles situées au centre et aux extrémités des mots) sont les plus informatives. Dans le modèle qu'ils présentent, la probabilité d'identifier une lettre ne varie pas en fonction du décalage horizontal ; quelle que soit la position de la fixation, les lettres utilisées pour prédire la reconnaissance d'un mot sont toujours les deux lettres les plus proches du point de fixation et les deux lettres extrêmes. En gardant toujours le même nombre de lettres identifiées, ils arrivent toutefois à prédire la forme des courbes OVP, suggérant donc que celle-ci peut résulter uniquement de la fréquence positionnelle des lettres dans les mots du lexique. Notre expérience apporte plusieurs arguments allant à l'encontre d'un rôle exclusif des facteurs lexicaux dans le phénomène OVP. Tout d'abord, même si la fréquence des mots avait un effet significatif sur le niveau général des performances, nous n'avons observé, conformément aux études précédentes, aucune interaction entre la fréquence et le décalage horizontal, ce qui suggère que l'effet OVP ne résulte pas du traitement lexical des mots ([O'Regan & Jacobs, 1992](#), voir aussi [O'Regan & Lévy-Schoen, 1987](#); [McConkie et al., 1989](#); [Vitu et al., 2001](#); [Nuthmann et al., 2005](#)). De plus, même si la répartition de l'information dans les mots n'a pas été contrôlée, nous avons fait notre possible pour que ce facteur n'influence pas nos résultats en choisissant et en répartissant les mots de manière aléatoire entre les différents blocs d'essais. Mais surtout, nous avons montré que l'effet OVP était affaibli lorsque les mots étaient présentés dans la

partie inférieure du champ visuel. Ce résultat est incompatible avec le postulat de Clark et O'Regan (1999) selon lequel les contraintes lexicales suffisent à rendre compte de la forme de l'effet OVP; en effet, la modification des pentes de l'effet OVP dans la condition de décalage vertical du mot indique que la quantité d'information visuelle disponible lors d'une fixation est responsable, au moins en partie de l'effet. Toutefois, nos résultats ne contredisent pas l'hypothèse selon laquelle la répartition de l'information dans le mot puisse contribuer à la forme de l'effet OVP. Stevens et Grainger (2003) ont proposé plusieurs modèles de la reconnaissance de mots et ont montré que la meilleure façon d'approcher les données empiriques était de combiner l'effet des facteurs visuels, représenté par la probabilité d'identifier une lettre dans une chaîne de caractères, et l'effet des facteurs lexicaux, représenté par la fréquence positionnelle relative des lettres. Il est possible que ce modèle fonctionne aussi en vision périphérique. Pour le savoir, il nous faudrait mesurer les performances de reconnaissance de lettres dans des chaînes de caractères dans la condition décalée verticalement en conservant les mêmes paramètres de taille de lettres et de temps de présentation que ceux que nous avons utilisés pour la reconnaissance de mots.

5-4-2-2 – Habitudes de lecture et effets de l'entraînement

L'effet du côté de fixation dans un mot a aussi été testé car il rend compte de l'asymétrie des courbes OVP. De la même manière que dans les études classiques (O'Regan et al., 1984; Brysbaert et al., 1996), nos données montrent un niveau de performance plus élevé ainsi que des pentes plus faibles lorsque le regard fixe dans la partie gauche plutôt que la partie droite du mot, que ce soit dans la condition centrée ou dans la condition décalée verticalement. Nous avons aussi obtenu une interaction significative entre le côté de présentation et le décalage vertical (non rapporté dans notre article pour des questions de simplicité de présentation), qui montre que l'avantage du champ visuel droit est moins marqué, sans toutefois être annulé, lorsque le mot est affiché en-dessous du point de fixation. Ce résultat est intéressant car il suggère une contribution de l'apprentissage perceptif à la forme de l'effet OVP sans toutefois exclure celles de l'acuité visuelle et de l'encombrement. Nazir (2000) avait proposé que l'avantage d'une position de fixation légèrement à gauche du centre des mots ne soit pas la conséquence de la diminution de la visibilité des lettres, mais uniquement le reflet d'un entraînement plus important de cette partie de la rétine pour la reconnaissance de mots (Mishkin & Forgays, 1952; Nazir et al., 2004). Selon nous, les

habitudes de lecture ne peuvent pas expliquer à elles seules le phénomène OVP ; si c'était le cas on aurait probablement obtenu des courbes beaucoup plus aplaties dans la condition décalée verticalement, car, dans le champ visuel inférieur, aucune zone n'est particulièrement entraînée à la reconnaissance de mots ([Pollatsek et al., 1993](#)). Toutefois, le fait d'avoir une asymétrie moins marquée dans la condition décalée verticalement est, selon nous, le signe d'une contribution partielle de l'apprentissage perceptif. Il semblerait que l'avantage du champ visuel droit soit toujours présent en vision périphérique mais que cet effet diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'axe horizontal central. Deux d'expériences pourraient être menées pour tester cette hypothèse. La première consisterait à étudier de façon paramétrique la diminution de l'avantage du champ visuel droit en fonction de plusieurs degrés de décalage vertical. La deuxième serait de tester si cet effet peut être renforcé par l'entraînement, en forçant des participants à lire des lignes de texte (écrites de gauche à droite) avec la partie inférieure de leur champ visuel et en testant les effets d'un tel entraînement sur l'asymétrie des courbes OVP dans la condition décalée verticalement.

Il reste important de noter que pour que les participants s'adaptent plus facilement au protocole expérimental, nous avons choisi de ne pas contrebalancer les conditions et de toujours faire passer la condition centrée (plus facile) avant la condition décalée verticalement. Il est peu probable néanmoins que l'habitué progressive des participants à identifier les mots présentés en périphérie soit responsable de l'aplatissement des courbes observé dans la condition décalée verticalement. L'effet de l'entraînement avait déjà été testé par Chung et al. ([2004](#)) dans une tâche d'identification de lettres présentées dans des triplets ; ils avaient observé une amélioration du niveau général des performances mais aucun changement significatif de la pente des courbes représentant la proportion d'identification correcte en fonction de la position horizontale des lettres. De plus, dans notre expérience, nous avons testé l'effet du numéro du bloc ainsi que son interaction avec la distance horizontale, et, de la même manière, nous avons obtenu un effet simple du facteur bloc, témoignant d'une amélioration des performances au cours de l'expérience, mais pas d'interaction avec la distance horizontale, suggérant donc que la forme de l'effet OVP n'était pas influencée par l'apprentissage.

5-4-2-3 – Temps de présentation

Legge et al. (2001) ont montré que la taille de l'empan visuel augmentait avec le temps de présentation et diminuait lorsque l'excentricité verticale augmentait. Bien que dans leur étude, au contraire de la notre, l'excentricité verticale était compensée par une augmentation de la taille des caractères, ceci nous amène à nous poser la question de l'influence du temps de présentation sur la forme de l'effet OVP. En effet, nous avons choisi d'augmenter la durée de présentation dans la condition décalée verticalement (148 ms contre 34 ms en centré) pour compenser la diminution de la visibilité des lettres. Il serait possible que l'aplatissement des courbes observé dans la condition décalée verticalement soit dû à l'augmentation du temps de présentation. Deux arguments, cependant, vont à l'encontre d'une telle éventualité. Tout d'abord, les résultats rapportés par Brysbaert et al. (1996) montrent que, lorsque l'on évite les effets de plafond ou de plancher, la forme de l'effet OVP ne varie pas en fonction du temps de présentation (dans leur étude, les temps de présentation allaient de 28 à 84 ms en vision centrale). De plus, si l'on fait une estimation à l'œil, à partir des graphiques présentés par Legge et al. (2001), de la taille de l'empan visuel correspondant à nos conditions expérimentales (c'est-à-dire 34 ms à 0° et 148 ms à 3° d'excentricité verticale), on obtient un empan légèrement plus grand dans la condition centrée que dans la condition décalée (écart-type d'environ 6 lettres en centré et de 5 lettres en décalé vertical). Cela suggère en contradiction avec nos données, que le temps de présentation aurait du favoriser non pas une diminution, mais une augmentation de la pente des courbes OVP dans le champ visuel inférieur, en comparaison avec la condition centrale. Toutefois le fait que, dans l'expérience de Legge et al. (2001), la taille des caractères était différente entre les conditions rend la comparaison avec nos données assez difficile. La seule façon de nous assurer de l'absence d'un effet du temps de présentation dans notre protocole serait de comparer les courbes OVP dans la condition de décalage verticale pour plusieurs durées de présentation.

5-4-3 – Implications pour la lecture en vision périphérique

Comme nous l'avons expliqué dans l'introduction de ce chapitre, les résultats obtenus ici nous apportent des éléments de réponse supplémentaires à la question de l'avantage théorique d'une position de PRL chez les patients atteints de DMLA. Nous avons vu qu'une PRL verticale et plus particulièrement, située en dessous du scotome, présentait l'avantage de ne pas masquer la ligne de texte et de permettre une vision globale des mots (Déruez et al.,

[2002](#)). De plus, comme l'ont proposé Petre et al. ([2000](#)), placer sa fovéa au-dessus plutôt qu'à côté du mot cible permet aussi de réduire l'excentricité moyenne des lettres et devrait augmenter la probabilité de les identifier. Enfin, le troisième argument découlant des résultats de Pelli et al. ([2007](#)) est qu'une PRL verticale devrait permettre de réduire les effets néfastes liés à l'encombrement. Une raison supplémentaire apportée par nos données est le fait que l'effet OVP soit moins marqué dans la condition décalée verticalement. Ceci suggère que le fait d'aligner son regard avec le centre des mots n'est pas aussi important lorsque le mot est en dessous que lorsqu'il est sur le même axe horizontal que le point de fixation. Cet argument peut être décisif dans le choix d'une PRL lorsque l'on sait que les patients DMLA présentent des difficultés à programmer des saccades précises en direction du centre des mots ([Lingnau et al., 2008](#)).

Deux points sont cependant à garder à l'esprit. D'une part notre étude est limitée à la lecture de mots présentés à une excentricité de 3° , ce qui est très loin du diamètre moyen des scotomes que peuvent présenter les patients atteints de DMLA. Cependant, aucune raison ne s'oppose au fait que l'affaiblissement de l'effet que nous avons obtenu à 3° d'excentricité verticale se généralise aux autres parties du champ visuel ; a priori, l'effet devrait même être d'autant plus affaibli que le mot est plus excentré. D'autre part, l'avantage théorique d'une PRL n'est pas obligatoirement synonyme d'amélioration des performances de lecture chez les patients ; en effet, il n'a pour l'instant été mis en évidence aucune corrélation entre la position d'une PRL et la vitesse de lecture chez les personnes atteintes de DMLA ayant choisi leur PRL spontanément et depuis plusieurs années ([Fletcher et al., 1999](#); [Crossland et al., 2005a](#)). Mais, si elle s'avère être plus avantageuse pour la lecture, une PRL inférieure serait peut être à favoriser lors de la rééducation orthoptique des patients nouvellement atteints, qui n'ont pas encore développé de stratégie de lecture préférentielle.

5-5 – CONCLUSION

Nous avons montré ici que l'effet OVP est moins marqué lorsque le mot est décalé verticalement par rapport au point de fixation. Ce résultat, qui n'avait encore jamais été mis en évidence, confirme, d'une nouvelle manière, le rôle de l'acuité visuelle et de l'encombrement dans la reconnaissance de mots et plus particulièrement dans la forme de l'effet OVP. De plus, le fait que l'alignement de la fixation avec le centre des mots ne soit pas aussi avantageux dans le champ visuel inférieur constitue un argument théorique

supplémentaire en faveur du choix d'une PRL verticale chez les patients porteurs d'un scotome maculaire.

CHAPITRE 6 : ETUDE DU ROLE DE LA STABILITE DE FIXATION SUR LA LECTURE EN VISION PERIPHERIQUE

6-1 – INTRODUCTION

Nous avons vu, dans le premier chapitre expérimental, que la diminution des capacités visuelles lorsque l'excentricité des stimuli augmente contraint fortement la reconnaissance des mots en vision centrale et en vision périphérique. Ces mêmes contraintes, chez les personnes atteintes de DMLA, sont considérées comme étant responsables, au moins en partie, de leurs faibles performances de lecture. Mais, en vision périphérique, la vitesse de lecture est aussi fortement contrainte par les performances oculomotrices, qui diminuent lorsque l'excentricité de fixation augmente. Les études réalisées chez les patients atteints de DMLA, mais aussi chez des lecteurs sains utilisant un scotome artificiel, suggèrent un rôle limitant de deux facteurs oculomoteurs principaux : la programmation saccadique et la stabilité de fixation. Cette expérience se concentre sur l'étude de la stabilité de fixation lors de la lecture en présence d'un scotome maculaire artificiel et de son effet sur la vitesse de lecture.

6-1-1 – La programmation saccadique

Pour pouvoir lire un texte, que ce soit en vision centrale ou en vision périphérique, il est nécessaire d'effectuer des saccades afin d'identifier successivement les différentes parties de la phrase. En vision centrale, les lecteurs effectuent des saccades progressives horizontales, d'amplitude relativement constante (6 à 9 caractères), ainsi qu'une proportion assez réduite de saccades régressives (environ 15%). En vision excentrée, en revanche, le comportement oculomoteur est beaucoup plus erratique. Les saccades sont en moyenne deux fois plus courtes, et les lecteurs ont du mal à maintenir leur PRL au niveau de la ligne de texte ([Lingnau et al., 2008](#)). Ceci est notamment dû au fait qu'en présence d'un scotome central, les saccades n'ont plus pour but de placer l'élément à identifier sur la fovéa, mais dans une zone périphérique de la rétine, au niveau de leur PRL. Il a été montré, dans des tâches de visée de cible isolée, que les saccades dirigées vers la PRL présentaient une dispersion et une latence plus importantes que les saccades de fovéation ([Whittaker Stephen G. et al., 1991](#)). Elles

s'accompagnent aussi de l'activation plus importante de zones corticales impliquées dans les phénomènes attentionnels ([Little et al., 2008](#)). Ceci peut s'expliquer par le fait que, chez les personnes porteuses d'un scotome, la PRL n'est pas définie comme l'origine du référentiel de mouvement (sauf dans certains cas, voir par exemple [White & Bedell, 1990](#)) et que, par conséquent, la direction et/ou l'amplitude des saccades doit être ajustée pour éviter qu'à la prochaine fixation la cible ne soit masquée par le scotome. L'efficacité de la programmation saccadique ne peut pas être mesurée directement durant la lecture d'un texte car il est impossible de savoir précisément quelle sera la « cible » de la prochaine saccade, mais il est possible de comparer les performances des patients dans des tâches de visée de cible et leur vitesse de lecture de texte. McMahon et al. ([1991](#)) ont ainsi montré que le nombre de saccades effectuées dans une tâche de séquençage de lettres était fortement corrélé à la vitesse de lecture des patients atteints de DMLA. Il a aussi été montré que les performances de lecture de ces patients pouvaient être améliorées grâce à un entraînement oculomoteur basé uniquement sur des tâches de visée de cible ([McMahon et al., 1993](#); [Seiple et al., 2005](#)). Le nombre de saccades nécessaires pour lire une phrase, qui est fortement corrélé à la vitesse de lecture ([Rumney & Leat, 1994](#); [Bullimore & Bailey, 1995](#); [Scherlen et al., 2008](#)), peut aussi être vu comme un indicateur de la programmation saccadique : un nombre important de saccades peut signifier que le sujet a des difficultés à positionner son regard de façon adaptée ou à viser une position optimale pour la prochaine fixation. Mais cette variable peut être corrélée à un nombre important d'autres variables oculomotrices telles que la durée des fixations (plus les fixations sont courtes, plus le nombre de saccades est important), la direction ou l'amplitude des saccades (plus les saccades sont grandes et dirigées vers l'avant, moins leur nombre sera important) ; il est donc souvent difficile de déterminer quels phénomènes sous-tendent une variation du nombre de saccades pendant la lecture.

6-1-2 – La stabilité de fixation

L'instabilité de fixation est le deuxième facteur oculomoteur jugé responsable des faibles performances de lecture des patients DMLA et des lecteurs utilisant un scotome central artificiel. Elle est généralement représentée par l'aire de la BCEA (pour *Bivariate Contour Ellipse Area*, voir [6-2-6](#)). La BCEA est une zone elliptique dans laquelle se situe un pourcentage donné (souvent 68% par convention) des points de fixation du participant pendant une tâche de fixation de cible d'une durée donnée (généralement autour de 10 à 30

secondes) ; son aire augmente lorsque la capacité à maintenir le regard stable diminue. Plusieurs études ont montré que l'aire de la BCEA, mesurée dans une tâche de fixation, était inversement corrélée à la vitesse de lecture des patients en RSVP ou en lecture de texte ([Crossland et al., 2004a; 2009](#)), suggérant que l'instabilité de fixation est bien un facteur oculomoteur limitant les performances de lecture en vision périphérique. L'instabilité de fixation est due, en partie, à l'excentricité de la fixation ; l'aire de la BCEA, qui est d'environ 80 à 1200 minarc² chez les participants sains ([Whittaker S. G. et al., 1988; White & Bedell, 1990](#)), augmente fortement lorsque l'excentricité de fixation augmente (elle est multipliée par trois à 10° d'excentricité chez [Sansbury et al., 1973](#)). Mais le fait que l'aire de la BCEA soit encore plus importante chez les patients atteints de DMLA (de 500 à 13000 minarc² ; [Schuchard et al., 1999](#)) et qu'elle ne soit pas nécessairement corrélée à l'excentricité de la PRL ([Crossland et al., 2004a; Reinhard et al., 2007](#)), suggère aussi que des facteurs, autres que l'excentricité, sont responsables de la diminution de la stabilité de fixation chez les patients.

Par ailleurs, la mesure de cette variable oculomotrice ainsi que sa corrélation avec la vitesse de lecture, soulèvent certaines questions d'ordre méthodologique. La première question à se poser lorsque l'on calcule l'aire de la BCEA, que ce soit durant une tâche de fixation ou de lecture, est de savoir quels critères choisir pour regrouper les points censés appartenir à la même distribution et quels sont les mouvements oculaires mesurés (voir [Castet & Crossland, 2012](#)). Dans les premières études mesurant la stabilité du regard durant une tâche de fixation de cible, les données recueillies n'étaient pas catégorisées. La BCEA était mesurée à partir de l'ensemble des échantillons de position enregistrés durant un essai d'une durée d'environ 30 secondes ([Crossland et al., 2009; Dunbar et al., 2010](#)). Ceci donne lieu à des valeurs de BCEA très élevées qui tendent à surestimer l'instabilité de fixation réelle des patients, car en regroupant tous les points enregistrés, on ne tient pas compte du fait que le patient ait pu effectuer des saccades de grande amplitude et éventuellement changer de PRL durant l'essai. Pour évaluer le nombre de PRL utilisées par un participant et ainsi apporter une mesure plus précise de la stabilité de fixation, Crossland et al. ([2004b](#)) ont proposé d'ajuster les distributions 2D des positions de fixation grâce à une méthode d'estimation non paramétrique appelée « estimation par noyaux » ou *KDE*, pour *Kernel Density Estimation* en anglais ([Silverman, 1986](#)). Cette méthode permet d'avoir une représentation visuelle des données et d'estimer, à l'œil, le nombre de pics (ou modes) de la distribution. Si la distribution contient plus d'un pic, on parle de distribution multimodale. Une fois le nombre

de modes déterminé (généralement de un à trois) grâce à la KDE, les moyennes et les écarts-types de chaque mode (en x et en y) sont estimés grâce à un algorithme d'espérance-maximisation (ou EM, [Dempster et al., 1977](#)) et des BCEA locales sont calculées à partir de ces valeurs. Ainsi, comme le montre la Figure 6.1, les aires des BCEA locales sont bien plus réduites que celle de la BCEA globale calculée à partir de tous les échantillons de position. Les BCEA locales rassemblent tout de même plusieurs fixations, mais ces fixations sont séparées par des saccades de faible amplitude et qui ne s'éloignent pas trop du point de fixation initial.

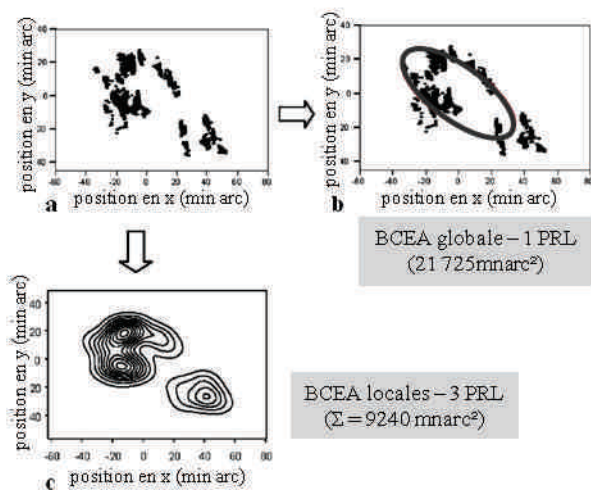


Figure 6.1 : Exemple de calcul de la BCEA de fixation à partir d'un jeu de données brutes (a). L'aire de la BCEA globale, estimée à partir de l'ensemble des échantillons (b, ellipse noire) est plus de deux fois supérieure à la somme des BCEA locales estimées grâce à la KDE (c). Le fait d'utiliser la méthode des BCEA locales permet de déterminer le nombre de PRL utilisées par le sujet et de ne pas surestimer son instabilité de fixation. Modifié depuis Crossland et al. ([2004b](#)).

Si la mesure de la BCEA, globale ou locale, s'avère adaptée à l'estimation des performances oculomotrices lors d'une tâche de fixation, elle ne peut pas être employée pour mesurer la stabilité de fixation durant la lecture de texte, car, dans ce cas, l'objectif du participant n'est pas de fixer une seule et même cible durant une période prolongée, mais au contraire, d'effectuer des saccades pour identifier successivement tous les mots de la phrase ou du texte. Par conséquent, les liens qui ont été établis entre la vitesse de lecture et la stabilité de fixation chez les patients DMLA ne sont que des corrélations entre deux mesures provenant de deux tâches différentes. La BCEA est calculée lors d'une tâche de fixation durant laquelle le participant a pour consigne de positionner une cible au niveau de sa PRL de fixation et de maintenir son regard le plus stable possible durant une période de temps relativement longue (de 10 à 30 secondes selon les expériences), tandis que la vitesse de

lecture est mesurée durant une tâche de lecture de texte ou en utilisant un paradigme RSVP. Même si les corrélations observées chez les patients entre la vitesse de lecture et l'aire de la BCEA sont assez robustes, on ne peut pas affirmer qu'il existe un lien de causalité entre ces deux variables, ni même savoir avec certitude si les tâches de fixation et de lecture reflètent les mêmes stratégies oculomotrices. En effet, il a été montré que la PRL utilisée durant la lecture pouvait être différente de celle utilisée lors d'une tâche de fixation ([Sunnness et al., 1996](#)), et aussi, que les patients DMLA ou les participants utilisant un scotome artificiel pouvaient utiliser plus d'une PRL pour identifier les mots ([Déruaz et al., 2002](#)). Si la PRL de fixation est différente de la (ou des) PRL utilisée(s) pour la lecture, il n'est pas cohérent de comparer les performances mesurées dans ces deux tâches. Pour résoudre ce problème, il faut s'assurer que le participant utilise la même PRL pour les deux tâches, en utilisant par exemple une PRL forcée de taille réduite (ou FRL pour *Forced Retinal Locus*, [Lingnau et al., 2008](#)). Une autre possibilité, comme nous proposons de le faire dans cette expérience, est de tenter de faire varier la stabilité de fixation durant une tâche de lecture avec scotome artificiel, cela par manipulation de la stimulation visuelle au centre du scotome, et de voir comment celle-ci affecte les performances de lecture.

6-1-3 – Objectif de l'étude et variable étudiée

Notre objectif était donc de tester l'influence de la **stimulation fovéale** sur les performances de lecture et la stabilité de fixation en testant l'effet de différents types de masque lors de la tâche de lecture. De précédentes études ayant testé l'effet de la taille de la cible sur la stabilité de fixation en vision centrale ont montré que la dispersion des points de fixation augmentait avec la taille de la cible ([Timberlake et al., 1972](#)), et qu'elle était deux à trois fois plus importante en l'absence totale de stimulation visuelle, lorsque l'on demandait aux sujets d'imaginer une cible dans le noir ([Morisita & Yagi, 2001](#)). Il est donc possible que la présence d'un stimulus fixe (par rapport à l'écran) et de petite taille au niveau de la fovéa puisse améliorer la stabilité de fixation en vision périphérique, et ainsi améliorer les performances de lecture, et cela même si les participants n'y portent pas leur attention.

Pour tester cette hypothèse, nous avons tout d'abord étudié les variations de la vitesse de lecture (exprimée en mots/mn) en fonction de trois types de scotome différents. Comme nous l'avons expliqué en détails dans le Chapitre 3, il est difficile, en présence d'un scotome central, de savoir quel mot est réellement fixé à un instant donné par le participant. Lorsque le

lecteur positionne son scotome au centre d'un texte de plusieurs lignes, il est impossible de savoir avec certitude dans quelle zone du champ visuel il porte son attention. Pour pallier ce problème, nous avons utilisé, dans notre expérience, des phrases présentées sur une seule ligne, mais surtout un masque dit « hémichamp » qui recouvrait toute la partie supérieure de l'écran jusqu'à 3° en-dessous de la position de fixation (position de la fovéa) du sujet (voir Figure 6.2). Cette méthode nous permettait de nous assurer que le participant n'utilisait que la partie inférieure de son champ visuel pour lire et que les mots lus étaient situés à une excentricité minimale de 3°. Dans la condition contrôle, le masque était uniforme, tandis que dans les deux autres conditions, il présentait une ouverture (petite dans l'expérience 1 et grande dans l'expérience 2) sur un fond texturé contenant des points aléatoires (noirs sur fond gris), fixes par rapport à l'écran (voir Figure 6.2). Ces points aléatoires étaient ajoutés dans le but de constituer un point d'ancrage pour la fovéa et éventuellement limiter la dispersion des positions du regard lors de la fixation. Il est nécessaire de préciser que l'ouverture permettait de voir le fond texturé mais pas de lire les mots en vision fovéale, car dès que les participants fixaient directement la ligne de texte, l'ensemble de l'écran était immédiatement caché par un masque uniforme. L'effet du type de masque sur la vitesse de lecture a été testé pour trois tailles de caractères (0,7°, 0,88° et 1,1°), toutes supérieures au CPS qui est estimé comme étant égal à 0,5° à 3° d'excentricité en RSVP ([Chung et al., 1998](#)).

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés à la **stabilité du regard** durant une fixation, c'est-à-dire à la distribution 2D des positions du regard entre deux saccades. Par analogie avec la BCEA mesurée habituellement au travers de plusieurs fixations, nous avons choisi de nommer cette variable la « BCEA par fixation » (abrégée BCEApf), tout en gardant à l'esprit que ces deux variables ne sont pas forcément représentatives des mêmes performances oculomotrices. En effet, la BCEA « globale », ou la BCEA « locale » mesurée à la manière de Crossland et al. ([2004b](#)), évaluent la capacité des participants à garder leur PRL dans une zone proche de la cible pendant une durée prolongée, en limitant notamment l'amplitude et la fréquence de leurs saccades. A contrario, la BCEApf définie ici, évalue la capacité des participants à limiter les déplacements de l'œil durant une seule fixation (d'environ 300ms). Ces déplacements apparaissant lors de la fixation peuvent être des microsaccades, des dérives ou des microtremblements (pour une revue voir [Martinez-Conde, 2006](#)). Le rôle de ces mouvements de faible amplitude en vision centrale est encore discuté et leurs caractéristiques durant la lecture n'ont été que très peu étudiées. Il a été montré que la fréquence des microsaccades était moins élevée lors de tâches impliquant des

fixations brèves et des saccades d'amplitude importante comme la lecture ([Winterson & Collewyn, 1976](#)) ainsi que lors de tâches visuelles nécessitant de distinguer des détails ([Kowler E. & Steinman, 1979](#); [Martinez-Conde, 2006](#)). Martinez-Conde (2006) ajoute aussi que les patients porteurs d'un scotome maculaire peuvent présenter une proportion plus importante de dérives durant une tâche de fixation. Notre hypothèse était donc, qu'en présence d'un scotome, l'amplitude de ces mouvements de faible amplitude pourrait être augmentée aussi durant la lecture, ce qui pourrait entraîner un déplacement trop important de l'image rétinienne et gêner l'extraction de l'information visuelle. Nous avons donc testé l'effet du type de masque sur l'aire de la BCEApf afin de savoir si la présence d'une stimulation fovéale stable pouvait contribuer à réduire l'instabilité du regard durant la fixation.

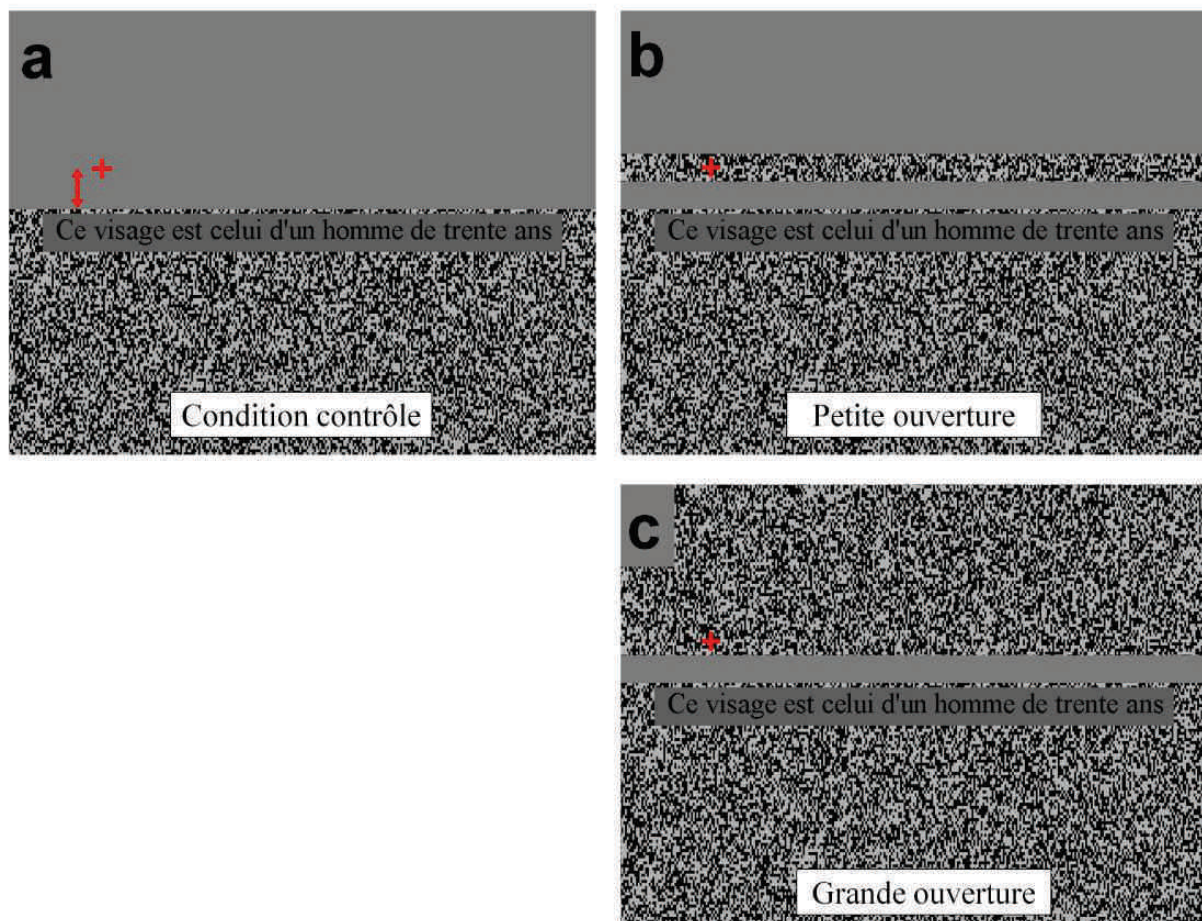


Figure 6.2 : Illustration des trois types de masque utilisés durant l'expérience : uniforme (a), petite ouverture (b) et grande ouverture (c). La croix rouge (n'apparaissant pas à l'écran) représente la position de fixation (fovéa) des sujets, et la flèche rouge indique que, quelle que soit la position de fixation, l'excentricité minimale de fixation est toujours de 3°.

6-2 – METHODE

6-2-1 – Participants

Quatre et six individus naïfs (âge compris entre 18 et 25 ans) ont participé aux expériences 1 et 2 respectivement. Tous étaient de langue maternelle française et avaient une vision normale, corrigée ou non. Les participants étaient dédommés à hauteur de 9 euros par heure d'expérimentation effectuée.

6-2-2 – Enregistrement des mouvements oculaires et scotome artificiel

Les mouvements oculaires des participants durant la tâche de lecture ont été mesurés à l'aide d'un oculomètre Eye-Link II (SR Research). Cet outil permet à la fois d'enregistrer les informations relatives à la position du regard et d'utiliser ces informations pour modifier, en temps réel, l'affichage des stimuli sur l'écran utilisé par le participant. Les données oculomotrices ont été analysées grâce au logiciel Data Viewer (SR Research Ltd., Mississauga, Ontario, Canada).

6-2-2-1 - Enregistrement des mouvements oculaires

Durant l'expérience, les participants étaient installés sur un siège inclinable, le regard situé à 40 cm de l'écran et la nuque maintenue par un coussin en mousse afin de minimiser les mouvements de la tête. L'enregistrement se faisait de manière monoculaire, uniquement sur l'œil dominant qui avait été déterminé au préalable par un test de lecture simple. Il est important de noter que ce dispositif d'enregistrement ne nécessite pas l'emploi d'une mentonnière lorsque les mouvements de la tête sont restreints ; cela permettait donc aux participants de lire les phrases à haute voix sans perturber l'enregistrement des mouvements oculaires. Les mouvements oculaires étaient enregistrés à une fréquence d'échantillonnage de 500Hz, ce qui correspond à une mesure de position toutes les 2 ms. Avant chaque bloc, des étapes de calibrage et de validation étaient effectuées. Le sujet devait fixer 5 points situés au centre et dans les 4 coins de l'écran. Le bloc d'essai démarrait si la différence moyenne entre calibrage et validation était inférieure à 1°. De plus la position du regard était vérifiée et corrigée à la fin de chaque essai afin de s'assurer que la caméra n'avait pas trop bougé durant

l'essai. Si la différence de position entre le début et la fin de l'essai ('offset') était supérieure à 2°, l'essai était éliminé.

6-2-2-2 - Scotome artificiel

Les phrases étaient présentées sur une seule ligne, au centre de l'écran, en noir sur une bande grise. Le reste de l'écran était recouvert par un fond texturé composé de points noirs sur fond gris. Les valeurs de position du regard données par l'oculomètre étaient enregistrées en temps réel et utilisées pour afficher un masque sur l'écran. Le masque était conçu pour bouger avec le regard du participant et le forcer à lire en utilisant la partie inférieure de son champ visuel, avec une excentricité minimale de 3°. Trois types de masque étaient utilisés (cf. Figure 6.2) :

- Dans la condition **contrôle**, le masque était gris uniforme, et couvrait toute la partie supérieure du champ visuel plus 3° en dessous du point de fixation. Les parties supérieure et centrale du champ visuel du sujet étaient donc en permanence recouvertes de gris (Figure 6.2a).

- Dans la condition expérimentale de l'expérience 1, le masque uniforme présentait une **petite ouverture** sur le fond texturé, c'est-à-dire, une bande horizontale transparente de 2° de hauteur, centrée verticalement sur la fovéa et s'étendant sur toute la largeur de l'écran (cf. Figure 6.2b).

- Dans la condition expérimentale de l'expérience 2, le masque était complètement transparent à l'exception d'une bande grise qui en délimitait la partie inférieure (de 2° à 3° en dessous du point de fixation) ; il y avait donc une **grande ouverture** sur le fond texturé qui occupait toute la zone supérieure et centrale du champ visuel du participant (Figure 6.2c).

Dans la condition contrôle aucune stimulation fovéale n'était donc disponible, alors que dans les conditions expérimentales, le participant avait en permanence une stimulation stable et texturée (points sur le fond) au niveau de la fovéa. Quel que soit le type de masque, le participant ne pouvait à aucun moment utiliser sa vision centrale pour lire la phrase, car s'il fixait directement la ligne de texte, un masque gris recouvrait complètement l'écran.

6-2-3 – Matériel

Les phrases présentées ont été extraites de la base créée par Bernard et al. (2007) composée de 5000 phrases tirées de romans d'Alexandre Dumas contenant les 20000 mots les

plus fréquents de la langue française. Pour pouvoir afficher les phrases sur une seule ligne, nous avons conservé uniquement celles ayant une longueur comprise entre 40 et 50 caractères soit 1439 phrases au total, présentées de manière aléatoire et jamais plus d'une fois à chaque participant. La longueur des mots contenus dans les phrases ne dépassait jamais 9 lettres. La taille des caractères a été définie comme la hauteur du 'x' minuscule dans la police choisie (Times). Trois tailles de caractères ont été utilisées : 0,7°, 0,88° et 1,1°

6-2-4 – Plan expérimental et procédure.

L'expérience était composée de quatre sessions d'environ une heure chacune effectuées sur plusieurs jours, sur une période totale ne dépassant pas deux semaines. Chaque participant a effectué six blocs d'entraînement de 10 phrases puis, selon sa progression, entre 24 et 36 blocs expérimentaux de 20 phrases chacun soit un total compris entre 480 et 720 essais. La taille des caractères et la condition de masque (uniforme ou avec ouverture) étaient les mêmes tout au long d'un bloc ; elles étaient choisies de manière aléatoire et annoncées au participant au début de chaque bloc. Les six participants de l'expérience 1 ont utilisé un masque avec une petite ouverture, et les quatre participants de l'expérience 2, un masque présentant une grande ouverture.

Un essai se déroulait de la manière suivante. Après les phases de calibrage et de validation de la position du regard, le participant avait pour consigne de fixer un point situé à 4° au dessus du centre de l'écran et de déclencher l'affichage de la phrase en appuyant sur le bouton réponse. La phrase était alors affichée au centre de l'écran. Le participant devait lire la phrase à haute voix puis valider avec le bouton réponse. Si un mot n'était pas lu correctement, si le temps de réponse était supérieur à 60 secondes, ou si la valeur de l'offset était supérieure à 2°, l'essai était exclu par l'expérimentateur.

6-2-5 – Variables analysées

Les données concernant les performances et les mouvements oculaires des participants ont été extraites sous deux formes. Le premier fichier (« fixation ») comprenait une ligne par fixation et donnait les vitesses de lecture par essai, ainsi que les informations concernant la condition expérimentale (numéro de session, taille des caractères, numéro du sujet...). Après avoir exclu les essais non valides, c'est-à-dire ceux faisant partie d'un bloc d'entraînement, ceux où la phrase n'avait pas été lue correctement et ceux où l'offset était supérieur à 2°, il

restait 5099 essais valides soit 192074 lignes. La vitesse de lecture était calculée directement par le programme expérimental en utilisant la méthode de Carver (1990), c'est-à-dire en divisant le temps de réponse par le nombre de lettres de la phrase puis en le multipliant par la longueur d'un mot « standard », soit 6 caractères. Elle est donc donnée en mots « standard » par minute.

L'aire de la BCEApf a été calculée à partir d'un deuxième fichier (« échantillon ») comportant une ligne par échantillon, c'est-à-dire, une ligne toutes les 2 ms. La quantité de données de ce fichier étant très importante, nous avons décidé de ne retenir qu'un échantillon sur quatre, soit une ligne toutes les 8 ms, et de ne traiter que les essais correspondant à la dernière session (4^{ème}) et à la taille de caractères la plus petite ($x=0,7^\circ$). En retenant uniquement ces échantillons-là, nous avons obtenu, après les mêmes sélections que pour le premier fichier (exclusion des blocs d'entraînement, des phrases mal lues et des offsets supérieurs à 2°), un fichier de 123435 lignes correspondant à 302 essais. La BCEA par fixation (BCEApf) a été mesurée à partir des coordonnées horizontale et verticale de position de l'œil données par le fichier «échantillon ». Dans notre expérience, la zone d'affichage était de 1152 pixels de largeur et 864 pixels de hauteur, un pixel correspondant à $0,04^\circ$ d'angle visuel. La ligne horizontale centrale était définie comme ayant une coordonnée verticale de 0. Les coordonnées de position de fixation étaient donc données en degrés d'angle visuel par rapport à la ligne centrale, les valeurs positives correspondant aux positions de fixation situées au-dessus de la ligne de texte. La BCEApf a été calculée en utilisant la formule utilisée habituellement pour calculer l'aire de la BCEA globale (Steinman, 1965) :

$$BCEApf = 2 * k * \pi * \sigma_x * \sigma_y * (1 - \rho^2)^{1/2}$$

- σ_x et σ_y sont les écarts-types des coordonnées horizontale et verticale des positions de l'œil données en minutes d'arc ; plus ces valeurs sont importantes, plus les axes de l'ellipse seront grands.

- ρ est le coefficient de corrélation de Pearson entre les variables x et y, calculé à partir de la formule $\rho = \sigma_{xy} / \sigma_x * \sigma_y$; il renseigne sur l'inclinaison de l'ellipse.

- k est une variable dépendant du pourcentage (P) de points que l'on souhaite inclure dans l'ellipse. Il est calculé grâce à la formule $k = - \ln (1 - P)$. Dans les expériences récentes mesurant l'aire de la BCEA (Crossland et al., 2004a; 2004b), le pourcentage d'inclusion

choisi est habituellement de 68%, ce qui correspond à une valeur de k de 1,14. C'est cette valeur que nous avons utilisée dans notre analyse.

6-3 – RESULTATS

6-3-1 – Effet de la condition de présentation sur la vitesse de lecture

6-3-1-1 – Représentation graphique des données brutes

Pour analyser l'effet de la condition de présentation sur la vitesse de lecture, nous avons sélectionné une ligne par essai dans le fichier « fixation », soit 3686 valeurs. Le plan expérimental était le suivant : 2 (expériences) x 2 (type de masque) x 3 (tailles de caractères) x 4 (numéro de session). Les vitesses de lecture moyennes en fonction de la taille de caractères et du numéro de session sont représentées aux Figures 6.3 et 6.4 respectivement, séparément pour les expériences 1 (à gauche) et 2 (à droite) et pour les différents types de masque (uniforme en gris, petite ouverture en orange et grande ouverture en bleu). Ces graphiques descriptifs montrent que la vitesse de lecture augmente de façon monotone avec la taille des caractères (excepté dans la condition $x=0,7$ et petite ouverture) et avec le numéro de session (excepté dans la session 2 et petite ouverture). Ils semblent aussi montrer que la vitesse de lecture diminue légèrement en présence du masque. Ces tendances ont été testées statistiquement dans un modèle à effets mixtes à dont les effets fixes sont rapportés dans le Tableau 6.1 présenté plus bas.

6-3-1-2 – Modèle statistique sur l'ensemble des conditions

Nous avons effectué une analyse de l'effet des variables indépendantes sur la vitesse de lecture grâce à un modèle de régression linéaire à effets mixtes (ou LMM pour *Linear Mixed effects Model*) sur l'ensemble des données obtenues dans les expériences 1 et 2 en utilisant la fonction `lme` du package NLME ([Pinheiro & Bates, 2000](#)) compris dans R ([R Development Core Team, 2008](#)). Ce modèle est similaire à celui décrit au Chapitre 5, à la différence près qu'ici, la variable dépendante (la vitesse de lecture) n'est pas binaire mais continue. Nous avons entré comme facteur aléatoire le numéro du sujet (1 à 10) et comme facteurs fixes :

- le type de masque, variable catégorielle à trois niveaux (uniforme, petite ouverture et grande ouverture). Le niveau « uniforme » ayant été choisi comme niveau de référence.

- la taille de caractères, variable continue à 3 valeurs (0,7°, 0,88° et 1,1°), centrée sur sa moyenne (0,9°).

- le numéro de session, variable continue à 4 valeurs (1, 2, 3 et 4), centrée sur sa moyenne (2,5).

Nous avons également inclus les interactions simples entre le type de masque et les deux autres facteurs fixes (taille de caractères et numéro de session).

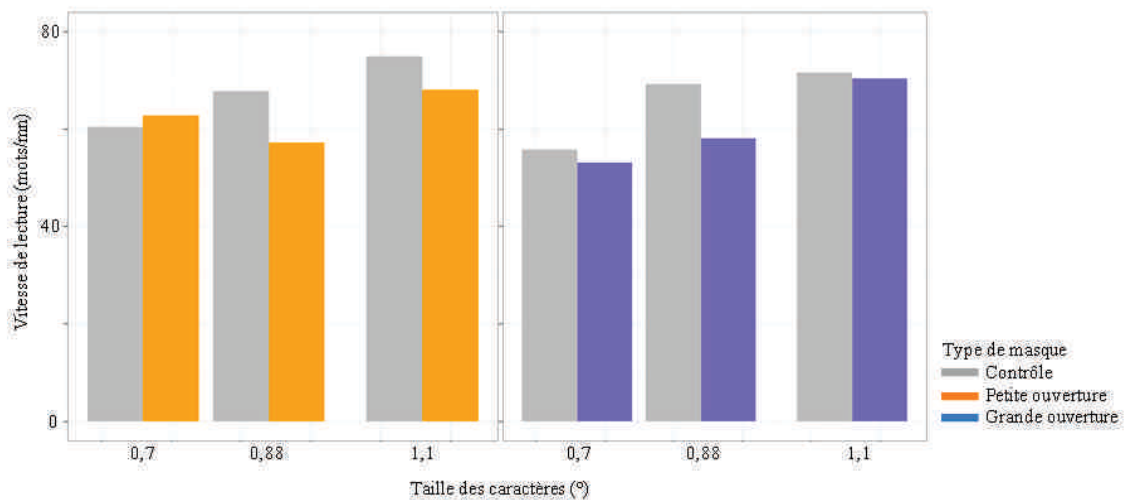


Figure 6.3 : Représentation graphique de la vitesse moyenne de lecture en fonction de la taille des caractères, séparément pour l'expérience 1 (à gauche) et 2 (à droite) et pour les trois types de masques (uniforme en gris, petite ouverture en orange et grande ouverture en bleu).

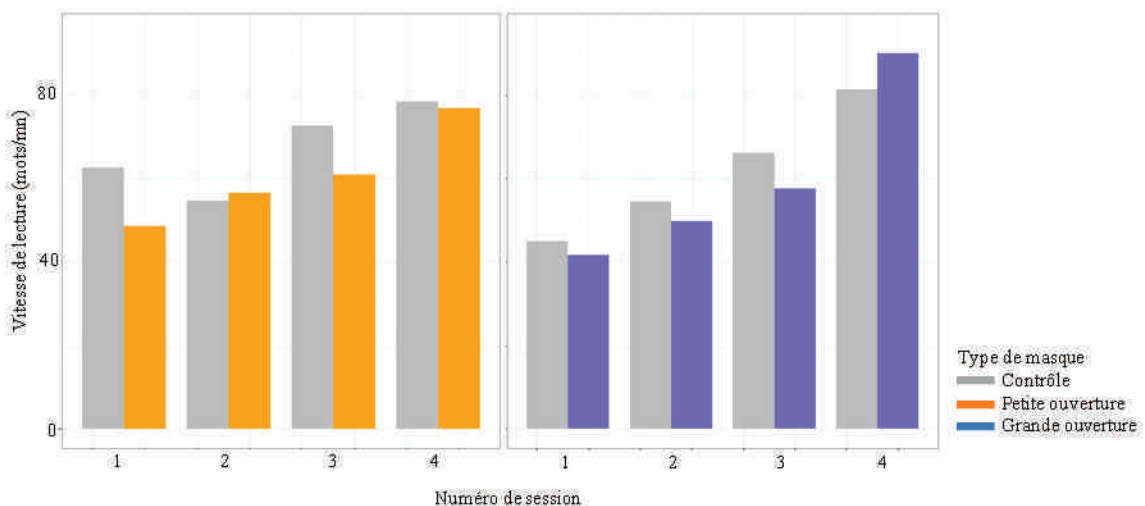


Figure 6.4 : Représentation graphique de la vitesse moyenne de lecture en fonction des quatre sessions expérimentales, séparément pour l'expérience 1 (à gauche) et 2 (à droite) et pour les trois types de masques (uniforme en gris, petite ouverture en orange et grande ouverture en bleu).

Les effets fixes obtenus grâce au LMM sont rapportés dans le Tableau 6.1 et représentés graphiquement à la Figure 6.5. La Figure 6.5a représente la relation linéaire prédite par le modèle entre la vitesse de lecture et la taille des caractères, et la Figure 6.5b, celle entre la vitesse de lecture et le numéro de session. L'ordonnée à l'origine indiquée dans la première ligne du Tableau (63,74 dans le tableau, points gris dans les figures) représente la vitesse de lecture estimée lorsque les prédicteurs continus, la taille des caractères et le numéro de session, sont à leur valeur moyenne (0,9° et 2,5 respectivement) et lorsque le prédicteur catégoriel, le type de masque, est à sa valeur de référence (« uniforme »). Les coefficients correspondant aux facteurs continus représentent le coefficient directeur de la relation linéaire entre ce facteur et la vitesse de lecture (la pente), lorsque les autres facteurs sont à leur niveau de référence. Le modèle montre donc un effet positif significatif de la taille des caractères (pente de la courbe grise de la Figure 6.5a = 42,41) et du numéro de session (pente de la courbe grise de la Figure 6.5b = 9,60) sur la vitesse de lecture. Les coefficients correspondant aux deux autres niveaux du facteur type de masque, « petite ouverture » et « grande ouverture », représentent la valeur à ajouter à l'ordonnée à l'origine pour obtenir la vitesse de lecture prédite dans ces deux conditions (points orange et bleus sur les figures). On note donc, au niveau de référence, une vitesse de lecture moins importante en présence d'une ouverture, qu'elle soit petite (57,60 mots/min) ou grande (58,84 mots/min), que dans la condition contrôle. Toutefois, la présence de certaines interactions significatives entre le type de masque et les deux autres prédicteurs, montre que l'effet de l'ouverture varie selon le numéro de session ou la taille des caractères.

Le coefficient d'une interaction entre un facteur continu et un facteur catégoriel (ici à deux niveaux) nous indique la valeur à ajouter au coefficient du facteur continu pour obtenir la pente de la courbe correspondant au deuxième niveau du facteur catégoriel. Si l'interaction est positive, la pente correspondant au deuxième niveau du facteur catégoriel sera plus importante que la pente de la courbe de référence, et inversement, une interaction négative indique une pente moins importante. Parmi les interactions que nous avons testées, deux sont significatives. La première est une interaction négative entre la petite ouverture et la taille des caractères, qui montre que l'effet de la taille des caractères sur la vitesse de lecture est moins important dans la condition « petite ouverture » (pente = $42,41 - 23,44 = 18,97$) que dans la condition contrôle (pente = 42,41). Cependant, comme le montre la Figure 6.5a, cette interaction n'est pas suffisante pour que la vitesse de lecture dans la condition « petite ouverture » devienne supérieure à celle de la condition contrôle, même pour les plus petits

caractères (0,7°). La deuxième interaction significative est l'interaction positive entre le numéro de session et la « grande ouverture », qui montre que l'augmentation de la vitesse de lecture en fonction du numéro de session est presque deux fois plus importante dans la condition « grande ouverture » (pente = 9,60+7,80 = 17,40) que dans la condition contrôle (pente = 9,60, ligne grise). Comme le montre la Figure 6.5b (ellipse bleue en pointillés), la présence de la grande ouverture a un effet positif sur la vitesse de lecture seulement à partir de la session 4.

	Coefficient	Ecart-type	DL	t	P
Ordonnée à l'origine	63.74	6.67	3688	9.57	0 *
petite ouv.	-6.14	1.41	3688	-5.38	0 *
grande ouv.	-4.90	1.46	3688	-3.36	0.0008 *
taille de carac. (°)	42.41	3.82	3688	11.1	0 *
num. de session	9.6	0.62	3688	15.56	0 *
petite ouv. : taille de carac.	-23.44	6.17	3688	-3.80	0.0001 *
grande ouv. : taille de carac.	8.99	7.16	3688	1.26	0.2095
petite ouv. : num. de session	1.51	1	3688	1.51	0.1314
grande ouv. : num. de session	7.8	1.25	3688	6.25	0 *

Tableau 6.1 : Effet fixes obtenus avec le LMM de la vitesse de lecture en fonction du type de masque, de la taille des caractères et du numéro de session. Les interactions sont représentées par les deux points « : », et les astérisques indiquent les effets significatifs.

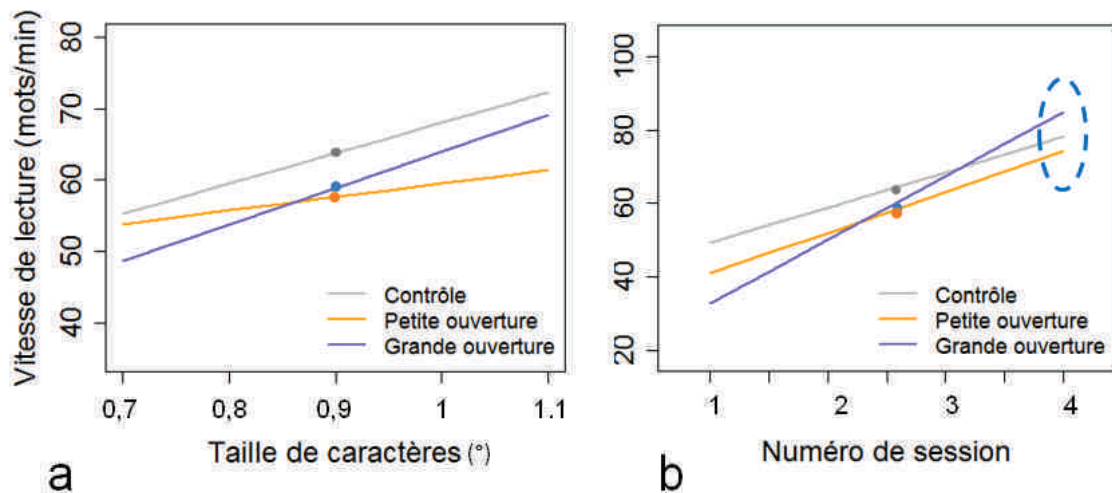


Figure 6.5 : Représentation des variations de la vitesse de lecture prédites par le LMM en fonction de la taille des caractères (a) et du numéro de session (b), pour les trois types de masque. Les points situés sur les droites indiquent l'ordonnée à l'origine (coefficient dans le Tableau 6.1) et l'ellipse en pointillés bleus la condition dans laquelle la grande ouverture semble avoir un effet positif sur la vitesse de lecture.

6-3-1-3 – Modèle statistique sur les données de la session 4

Compte tenu de l'interaction trouvée dans l'analyse précédente, nous avons effectué la même analyse statistique en sélectionnant uniquement les essais de la session 4. Nous avons donc testé l'effet de la taille des caractères et du type de masque sur la vitesse de lecture ainsi que leur interaction sur les 1023 essais correspondant à la dernière session expérimentale. Le facteur « sujet » était, là aussi, inclus en tant que facteur aléatoire. Les effets fixes de ce deuxième modèle sont présentés dans le Tableau 6.2 et dans la Figure 6.6. La vitesse de lecture à l'ordonnée à l'origine prédite par le modèle est de 80,61 mots/min. L'effet simple de la petite ouverture n'est pas significatif, mais ce facteur présente une interaction négative importante avec la taille des caractères (coefficient = -43,68). Ceci montre que la présence de la petite ouverture entraîne une amélioration des performances dans le cas des petits caractères ($x=0,7^\circ$, Figure 6.6, ellipse orange en pointillés), mais s'avère désavantageuse lorsque la taille des lettres est plus importante. L'effet simple de la grande ouverture en revanche, est significativement positif ; la vitesse de lecture prédite en présence de ce masque à la session 4 est de 89,82 mots/min, soit une amélioration moyenne de près de 12% par rapport à la vitesse de lecture dans la condition contrôle, et ce pour toutes les tailles de caractères (interaction entre le facteur grande ouverture et la taille des caractères non significative).

	Coefficient	Ecart-type	DL	t	P
Ordonnée à l'origine	80.61	8.5	1009	9.48	0 *
petite ouv.	-0.89	2.37	1009	-0.38	0.707
grande ouv.	9.21	3.08	1009	2.99	0.003 *
taille de carac. ($^\circ$)	64.31	7.98	1009	8.06	0 *
petite ouv. : taille de carac.	-43.68	13.72	1009	-3.18	0.002 *
grande ouv. : taille de carac.	-7.34	16.49	1009	-0.45	0.656

Tableau 6.2 : Effet fixes obtenus avec le LMM de la vitesse de lecture en fonction du type de masque et de la taille des caractères, pour la session 4 uniquement. Les interactions sont représentées par les deux points « : », et les astérisques indiquent les effets significatifs.

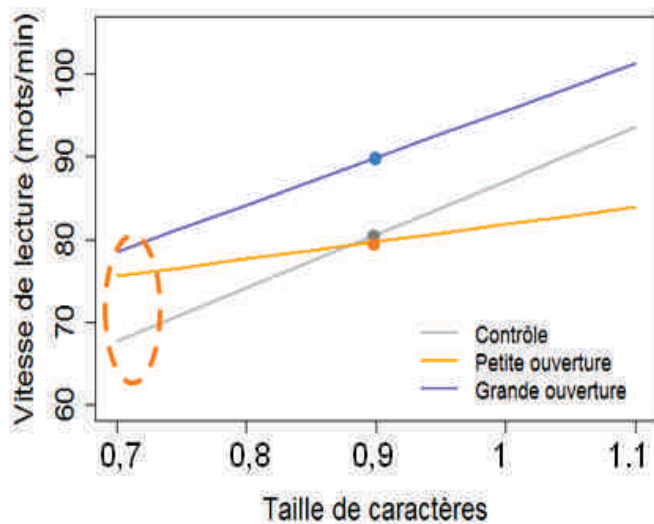


Figure 6.6 : Vitesses de lecture prédites par le LMM en fonction de la taille des caractères pour les trois types de masque à la session 4. Les points situés sur les droites indiquent l'ordonnée à l'origine pour chaque condition (coefficient dans le tableau 6.2) et l'ellipse en pointillés orange la taille de caractère pour laquelle la petite ouverture a un effet positif sur la vitesse de lecture. La grande ouverture entraîne une amélioration de la vitesse de lecture pour toutes les tailles de caractères.

6-3-2 - Effet de la condition de présentation sur la BCEApf

Dans un deuxième temps, nous avons testé l'effet du type de masque sur l'aire de la BCEApf afin de voir si la présence de la stimulation fovéale permettait d'améliorer la stabilité du regard durant les fixations. En raison de la quantité très importante de données, nous nous sommes concentrés uniquement sur la condition dans laquelle l'effet du masque était le plus important, c'est-à-dire, la session 4 et la petite taille de caractères ($0,7^\circ$). Nous avons réalisé un modèle à effets mixtes avec l'aire de la BCEApf (exprimée en minarc²) en variable dépendante, le type de masque en facteur fixe (niveau de référence = « uniforme ») et le numéro du sujet en facteur aléatoire. Ce modèle, dont les effets fixes sont présentés dans le Tableau 6.3, prédit une aire de BCEApf moyenne à l'ordonnée à l'origine de 156,39 minarc². Seul l'effet de la petite ouverture est significatif ; il montre une aire de BCEApf moyenne plus importante en présence de la petite ouverture (171,39 minarc²) que dans la condition contrôle. L'effet de la grande ouverture montre une tendance négative mais celle-ci n'est pas significative.

	coefficient	écart-type	DL	t	P
Ord. Origine	156,39	32,82	292	4,76	0*
petite ouverture	15,01	6,76	292	2,22	0,03*
grande ouverture	-16,05	10,38	292	1,55	0,12

Tableau 6.3 : Effets fixes obtenus grâce aux LMM de l'aire de la BCEApf en fonction du type de masque, pour la session 4 et la petite taille de caractères ($0,7^\circ$). Les effets significatifs sont marqués par une astérisque.

6-4 – DISCUSSION

Les personnes porteuses d'un scotome maculaire absolu, naturel ou artificiel, ne reçoivent aucune stimulation visuelle sur la partie centrale de leur rétine. Ceci pose tout d'abord des problèmes pour la détection et l'identification des stimuli visuels car les performances visuelles (acuité visuelle, encombrement, temps de traitement, sensibilité au contraste) diminuent lorsque l'excentricité de présentation augmente (voir Chapitre 2). Mais la présence d'un scotome entraîne aussi une diminution des performances oculomotrices, dont notamment une augmentation de l'instabilité de fixation et une détérioration de la programmation saccadique ([Sansbury et al., 1973](#); [Whittaker Stephen G. et al., 1991](#); [Schuchard et al., 1999](#)). Dans le cadre de l'étude de la stabilité du regard lors de tâches de fixation de cible, il a été montré que les participants porteurs d'un scotome maculaire (naturel ou artificiel) avaient du mal à maintenir leur regard, leur PRL, dans une zone proche de la cible et que l'aire de la BCEA, représentative de l'instabilité de fixation, augmentait de façon importante en fonction de l'excentricité de la cible ([Sansbury et al., 1973](#)). Il est probable que cela soit dû au fait qu'en plus d'empêcher l'identification des objets cibles, la présence d'un scotome maculaire entraîne la suppression de toute stimulation visuelle au niveau de la fovéa, et que, par conséquent, le système visuel ne dispose plus d'indices exogènes permettant de juger de la position de l'œil. Il est donc possible que, même si l'attention ne se porte pas au centre du champ visuel, la présence de stimuli au niveau de la fovéa puisse favoriser la stabilité du regard durant la fixation.

Cette expérience, dans laquelle nous avons étudié le comportement oculomoteur lors de la lecture de phrases en présence d'un scotome central, avait pour but de tester l'hypothèse selon laquelle la présence d'une stimulation fovéale pourrait permettre d'améliorer la vitesse de lecture, notamment en augmentant la stabilité du regard durant la fixation. Nos résultats montrent tout d'abord une amélioration de la vitesse de lecture lorsque la taille des caractères et le nombre de sessions effectuées augmentent. Ils révèlent aussi, mais uniquement à la session 4, un effet positif de la présence d'une stimulation fovéale stable sur la vitesse de lecture. La présence d'une grande ouverture sur le fond texturé a un effet positif significatif pour toutes les tailles de caractères, tandis qu'avec la petite ouverture, la vitesse de lecture est améliorée uniquement pour la plus petite taille de lettres. La présence de la stimulation visuelle au niveau de la fovéa n'entraîne, en revanche pas de diminution de l'aire de la BCEApf, suggérant que l'amélioration des performances ne serait pas due à une diminution

de l'instabilité du regard durant la fixation. En plus de son intérêt appliqué, ce résultat nous a amenés à réfléchir à d'autres facteurs liés à la stimulation fovéale qui seraient potentiellement responsables de l'augmentation de la vitesse de lecture en présence d'une ouverture dans le masque.

6-4-1 – Applications pratiques chez les patients DMLA

Parmi les patients atteints de dégénérescence maculaire, certains présentent des aires centrales de vision préservée, appelés « îlots », à l'intérieur du scotome. Si parfois ces îlots sont assez importants pour permettre de lire ou d'identifier des objets sans avoir à utiliser la vision périphérique, il arrive que cette zone soit trop petite ou que l'acuité visuelle y soit trop faible, et que les patients soient quand même contraints d'utiliser une PRL située au-delà des limites du scotome. Dans ce cas là, il est possible qu'ils puissent néanmoins utiliser des indices visuels apparaissant au niveau de leur fovéa comme repères pour la fixation. Nous avons montré ici qu'il était possible d'améliorer la vitesse de lecture en vision périphérique en ajoutant des stimuli visuels stables au niveau de la partie centrale du champ visuel, sous la forme d'un fond texturé formé de points aléatoires. Si nos résultats s'avéraient généralisables aux patients porteurs de scotome avec îlots, il serait peut être utile de leur proposer des supports écrits, physiques (papier) ou numériques, possédant un type similaire de fond texturé, afin de les aider à améliorer leur vitesse de lecture. Un autre avantage de ce type d'aide est qu'il ne nécessite pas, a priori, la mise en place d'une stratégie consciente ou d'un entraînement spécifique. Il semble que le système visuomoteur soit capable d'utiliser ces indices de manière automatique. En effet, dans notre expérience, les participants n'avaient aucune consigne relative à l'utilisation du masque, et pourtant, nous avons noté une amélioration de la vitesse de lecture, après seulement quatre heures d'utilisation.

6-4-2 – Facteurs liés à la stimulation visuelle.

Au début de cette expérience, nous avons émis l'hypothèse que la présence d'une stimulation visuelle fovéale lors de la lecture en vision périphérique pourrait éventuellement permettre d'améliorer la stabilité de fixation et par conséquent améliorer les performances de lecture. Si nous avons effectivement obtenu des vitesses de lecture plus importantes lorsque le masque était ouvert sur le fond texturé, nous n'avons pas obtenu l'effet attendu au niveau de l'aire de la BCEApf. Ceci peut être expliqué de plusieurs manières.

Tout d'abord, il est possible que la stabilité de fixation ne soit pas directement liée aux performances de lecture en vision excentrée. En effet, comme nous l'avons mentionné auparavant, ces deux variables étaient mesurées dans deux tâches différentes dans les études précédemment rapportées ([Schuchard et al., 1999](#); [Crossland et al., 2004a](#); [2009](#)). Par conséquent, même si les corrélations observées entre l'aire de la BCEA (globale ou locale) et la vitesse de lecture s'avéraient robustes, elles ne permettraient pas d'affirmer que l'instabilité de fixation soit effectivement un facteur limitant durant la lecture.

Une autre possibilité serait que la stimulation visuelle favorise effectivement la stabilité de fixation durant la lecture, mais que la BCEApf ne soit pas la bonne manière de la mesurer. En effet, la stabilité de fixation, telle que nous l'avons mesurée ici, représente la capacité à limiter les mouvements de faible amplitude apparaissant lors des fixations (microsaccades, dérives et microtremblements), alors que la BCEA mesurée classiquement dans des tâches de fixation, englobe aussi les saccades effectuées entre deux fixations ([Casett & Crossland, 2012](#)). C'est d'ailleurs la raison pour laquelle on observe une différence importante entre l'aire de la BCEApf que nous avons mesurée (environ 150 mnarc²) et celle de la BCEA globale obtenue chez les participants sains fixant une cible excentrée (6000mnarc² à 10° d'excentricité, [Sansbury et al., 1973](#)). On peut donc envisager que l'effet de la stimulation visuelle ne se voit pas au niveau de la dispersion des points au sein d'une fixation, mais, plutôt, par exemple, au niveau du nombre et/ou de l'amplitude des saccades nécessaires pour identifier un mot. Pour vérifier cette supposition il serait intéressant de mesurer les mouvements oculaires de façon plus précise, afin de mettre en évidence un éventuel effet du type de masque sur le comportement oculomoteur à l'échelle du mot.

Des analyses supplémentaires (non présentées ici) ont été réalisées, afin de déterminer plus précisément quelle composante du comportement oculomoteur pouvait être influencée par la présence de la stimulation fovéale et entraîner une amélioration de la vitesse de lecture. Notre idée était que la présence du fond texturé en fovéa, mais surtout au niveau du point d'atterrissage de la prochaine saccade pourrait aider les sujets à viser plus précisément une position optimale pour la prochaine fixation et surtout leur éviter d'exécuter des saccades dans des directions non désirées, comme par exemple en direction de la ligne de texte (ce qui a pour effet de masquer entièrement l'écran). Nous avons pour cela comparé les distributions des amplitudes des saccades progressives ainsi que celles des directions de l'ensemble des saccades en fonction de la présence ou pas d'une ouverture dans le masque (non présenté ici). Même si les graphiques suggéraient une légère réduction de la proportion des saccades de

courte amplitude (pour les deux types d'ouverture) et des saccades dirigées vers le haut de l'écran (petite ouverture uniquement) aucun effet du type de masque ne s'est avéré significatif pour ces deux variables.

Enfin, on peut envisager que l'effet du type de masque que nous avons observé soit en réalité le reflet de stratégies, volontaires ou non, mises en place par les participants au cours de la tâche. Ils auraient pu, par exemple, utiliser la bande grise du masque avec la grande ouverture, comme point de repère pour positionner leur regard par rapport à la ligne de texte. Mais cette hypothèse est peu probable, car, si c'était effectivement le cas, nous aurions probablement dû observer le même effet pour l'autre type de masque ouvert, qui lui aussi présentait une bande grise entre le point de fixation et la ligne de texte.

6-5 - CONCLUSION

Nous avons donc montré, dans cette expérience, que la présence d'une stimulation fovéale stable lors de la lecture de phrases isolées permettait, après quelques heures d'entraînement, d'améliorer la vitesse de lecture en présence d'un scotome artificiel central. En revanche, nous n'avons pas encore réussi à déterminer de façon définitive quels étaient les mécanismes qui sous-tendaient ce phénomène. Contrairement à ce que nous pensions au départ, cela ne semble pas être attribuable à la stabilité du regard durant la fixation puisque celle-ci ne variait pas avec la stimulation fovéale. Quels que soient les facteurs responsables de l'effet observé, les résultats obtenus encouragent l'utilisation d'un fond texturé comme aide à la lecture pour les patients porteurs d'un scotome maculaire présentant des îlots de vision préservée.

CHAPITRE 7 : ETUDE DE L'EFFET DE LA TAILLE DES LETTRES SUR LE COMPORTEMENT OCULOMOTEUR EN VISION CENTRALE

7-1 – INTRODUCTION

Le rôle de la taille des caractères sur les mouvements oculaires lors de la lecture est un sujet peu abordé dans le domaine de la lecture en vision centrale, parce qu'il est communément admis que, lorsqu'elle est comprise dans une gamme allant de $0,2^\circ$ à 1° , la taille des lettres n'influence significativement ni la vitesse de lecture ni le comportement oculomoteur moyen ([Lamarre, 1892](#); [Morrison & Rayner, 1981](#); [O'Regan et al., 1983](#) pour une revue voir [O'Regan, 1990](#); [Rayner, 1998](#)). Dans cette gamme, la durée moyenne des fixations est d'environ 225 ms et l'amplitude des saccades est comprise entre 6 et 9 caractères, et ce quelle que soit la taille des caractères ou la distance de présentation ([Rayner, 1998](#)). Ce résultat, assez peu discuté jusqu'à présent, a amené les chercheurs à définir la lettre comme l'unité de mesure de l'amplitude des saccades lors de la lecture. Même si la lettre semble en effet être l'unité la plus adaptée à l'étude des mécanismes de la lecture, plusieurs résultats montrent que, selon la gamme de valeurs dans laquelle on se situe, la taille des lettres peut influencer la vitesse de lecture, la taille de l'empan visuel et les mouvements oculaires, que ce soit en vision centrale ou périphérique ([Legge et al., 1985a](#); [Chung et al., 1998](#); [Rayner, 1998](#); [Legge et al., 2007](#)). De la même façon, les résultats que nous avons obtenus au Chapitre 5 suggèrent que la visibilité des lettres en vision périphérique varie de façon différente selon que l'on choisisse, ou non, de compenser l'augmentation de l'excentricité verticale par une augmentation de la taille des lettres. Par ailleurs, les nombreuses études portant sur la précision des saccades vers une ou plusieurs cibles présentées en vision périphérique indiquent que la métrique des saccades varie de façon importante avec l'excentricité des stimuli et la distance qui les sépare ([Casteau & Vitu, 2012](#) pour une revue voir [Findlay & Walker, 1999](#)). Sous l'hypothèse où les mêmes mécanismes sous-tendent la programmation des saccades lors de la lecture de texte, la taille des caractères devrait avoir un impact sur les mouvements oculaires pendant la lecture (voir [Vitu, 2008](#)).

Le but de cette expérience était donc de réétudier le rôle de la taille des caractères sur les mouvements oculaires lors de la lecture. Bien que notre travail concerne aussi la lecture en vision périphérique, il était nécessaire dans un premier temps de réévaluer l'effet de la taille des caractères en vision centrale. Ce choix était justifié notamment par le fait que les mouvements des yeux peuvent plus facilement et surtout plus précisément être mesurés dans le cadre de la lecture normale. Les effets robustes observés, en vision centrale, sur le comportement oculomoteur intra- et inter-mots, tels que les effets *I-OVP*, l'effet *OVP* pour la refixation (*rOVP*) ou l'effet du site de départ, constituent une base idéale à l'étude de l'effet de la taille des caractères. En effet, ils permettent de mettre en évidence des effets fins, apparaissant à l'échelle du mot, qui ne ressortent pas forcément à l'échelle « globale », lorsque l'on mesure seulement les valeurs moyennes de l'amplitude des saccades et la durée des fixations, comme cela était le cas dans les études passées. De plus, si comme nous le pensons, la taille des lettres peut avoir un effet sur le comportement oculomoteur, nos observations devraient renseigner les modèles et théories actuelles du guidage oculaire lors de la lecture.

7-1-1 – Données empiriques sur l'effet de la taille des caractères

Il a tout d'abord été montré que la taille des caractères pouvait influencer les **performances de lecture** en vision centrale, lorsqu'elle était supérieure à 2° ou lorsqu'elle était très réduite et se situait en dessous du CPS ([Legge et al., 1985a](#); [Rayner, 1998](#)). Le CPS, estimé à 0,2° en vision centrale, est défini comme la plus petite taille de caractères pour laquelle un participant peut lire à sa vitesse maximale (environ 1000 mots par minute en RSVP, [Chung et al., 1998](#)). Ainsi, la vitesse de lecture augmente de façon linéaire avec la taille des caractères pour atteindre un plateau à partir du CPS, puis elle diminue à nouveau pour des valeurs supérieures à 2°. La valeur du CPS augmente de façon linéaire avec l'excentricité rétinienne (elle est d'environ 1,5° à 10° d'excentricité, [Chung et al., 1998](#)). Cette augmentation est principalement due à la diminution de l'acuité visuelle, à l'augmentation du temps de traitement et à l'augmentation des effets de l'encombrement lorsque l'excentricité des stimuli visuels augmente ([Wilson et al., 1990](#); [Pelli et al., 2004](#)). Par conséquent, si la taille des lettres n'a pas un réel rôle limitant en vision centrale, du fait de la valeur relativement basse du CPS (0,2°), elle joue un rôle déterminant en vision périphérique, notamment chez les patients porteurs d'un scotome maculaire.

Legge et al. (2007) ont aussi montré que la **taille de l'empan visuel** variait en fonction de la taille des caractères (voir aussi [O'Regan et al., 1983](#)), et ce, de façon très similaire à la vitesse de lecture. Cette corrélation indirecte entre la taille de l'empan visuel et la vitesse de lecture a d'ailleurs amené les auteurs à proposer que la taille de l'empan soit le principal prédicteur des performances de lecture en vision centrale et périphérique (voir aussi [Legge et al., 1997a; 2001](#)). La taille de l'empan mesurée en RSVP par Legge et al. (2007) était maximale lorsque la taille des lettres était comprise entre $0,12^\circ$ et $0,5/1^\circ$, soit environ une à quatre fois le CPS (de 5 à 6 lettres à 90% pour un temps de présentation de 100 ms), puis elle diminuait au-delà de ces limites. O'Regan et al. (1983) ont mesuré les variations de l'empan visuel en fonction de la distance de présentation et rapportent une très légère augmentation lorsque la taille des lettres diminue de $0,48^\circ$ à $0,24^\circ$ (l'empan à 50% passe de 10 à 11 lettres pour des mots présentés durant 150 ms), puis une diminution rapide en dessous de cette taille. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'influence de la taille des caractères sur l'empan visuel en vision périphérique. La plupart des auteurs considère que, comme en vision centrale, l'empan visuel ne devrait pas être modifié par la taille des lettres, tant que l'on reste dans une gamme comprise entre une et quatre fois la taille du CPS correspondant à l'excentricité étudiée ([Rubin & Legge, 1989](#); [Legge et al., 2001](#); [Crossland et al., 2005b](#)). Mais cette assertion est peut être un peu hâtive. En effet, comme nous l'avons suggéré précédemment, il est possible que les contraintes visuelles liées aux propriétés de l'acuité et de l'encombrement n'influencent pas l'empan visuel de la même manière suivant la position des lettres dans le champ visuel, et que, lorsque le regard est décalé verticalement par rapport au mot, choisir une taille de caractères supérieure au CPS puisse entraîner une diminution de la taille de l'empan ([Pelli et al., 2004](#) et voir Chapitre 5).

Enfin, concernant les mouvement oculaires, il a été observé que la **durée moyenne des fixations** pouvait augmenter lorsque la taille des caractères était inférieure à $0,1^\circ$ ou $0,2^\circ$ (pour une revue voir [Rayner, 1998](#)). O'Regan et al (1983) rapportent aussi une augmentation de la durée des fixations lorsque la taille est inférieure à $0,24$. Au-dessus de cette valeur seuil de $0,2^\circ$, aucun effet de la taille des caractères sur la durée des fixations n'a, à notre connaissance, été rapporté. De plus, aucune des études réalisées ne montre un effet significatif de la taille des caractères sur l'amplitude des saccades progressives. Mais il est possible que cet absence d'effet soit due au fait que les amplitudes de saccades et les durées de fixations ont toujours été mesurées de manière « globale », c'est-à-dire, en faisant la moyenne de tous les échantillons recueillis lors de la lecture d'un texte. Il est cependant possible qu'un facteur

dont l'effet n'est pas visible à l'échelle « globale », puisse agir, par exemple, sur la dispersion des données. Il est aussi possible qu'il entraîne une modification du comportement oculaire local, mesuré par rapport aux frontières entre les mots, et/ou que son effet varie en fonction d'autres variables, comme par exemple la position du regard dans les mots.

7-1-2 – *rOVP*, *I-OVP* et taille des caractères

Lorsque l'on mesure les caractéristiques des mouvements oculaires à l'échelle du mot, la durée des fixations et la probabilité de refixer le mot varient de façon caractéristique en fonction de la position du regard par rapport au centre du mot. La durée de la première fixation sur un mot, quel que soit le nombre de fixations sur le mot (et dans une certaine mesure, celle de la deuxième fixation dans le cas d'une refixation) est maximale lorsque le regard fixe le centre du mot et diminue à mesure que la position de la fixation se rapproche du début ou la fin du mot (Vitu et al. [2001](#); [2007](#); voir aussi [O'Regan & Lévy-Schoen, 1987](#)). De façon presque symétrique, la probabilité de refixer un mot est minimale lorsque la position de la fixation initiale est proche du centre du mot et elle augmente à mesure que la fixation initiale s'éloigne de cette position ([O'Regan & Lévy-Schoen, 1987](#); [McConkie et al., 1989](#); [Vitu et al., 1990](#)). Ces deux phénomènes, appelés effet *I-OVP* (pour *Inverted Optimal Viewing Position*) et *OVP* pour la refixation (*rOVP*), par analogie avec le phénomène *OVP* observé pour la reconnaissance de mots (voir Chapitres 2 et 5), ont donné lieu à plusieurs interprétations qui prédisent différents effets en cas d'une diminution ou d'une augmentation de la taille des caractères.

Une partie importante des modèles du guidage oculomoteur durant la lecture est basée sur l'hypothèse à dominante cognitive selon laquelle la durée des fixations ainsi que la proportion de refixations dépendraient principalement de la **difficulté du traitement** du mot fixé et éventuellement de celui du mot situé en parafovéa (e.g. [Reichle et al., 2003](#); [Engbert et al., 2005](#); voir Chapitre 2). Cette hypothèse repose principalement sur le fait que les valeurs moyennes de ces deux variables peuvent être influencées par certains facteurs liés à la difficulté des mots : la durée des fixations et la proportion des refixations augmentent lorsque le traitement est rendu plus difficile par une diminution de la fréquence et de la prédictibilité des mots ou par une diminution du prétraitement parafovéal (pour une revue voir [Rayner, 1998](#)). Si cette hypothèse peut expliquer le phénomène *rOVP*, c'est-à-dire l'augmentation de la proportion de refixation lorsque le regard s'éloigne du centre des mots, par un traitement

plus difficile lorsque le regard fixe les extrémités d'un mot (voir aussi [McConkie et al., 1989](#)), elle ne permet toutefois pas d'expliquer pourquoi les durées de fixations sont plus longues (et non pas plus courtes) au centre des mots, là où la reconnaissance des mots est censée être optimale (voir phénomène *OVP*, [Nazir et al., 1991](#); [Clark & O'Regan, 1999](#)). Une interprétation en termes de difficulté de traitement pourrait néanmoins être avancée pour expliquer l'augmentation de la durée des fixations lorsque la taille des caractères est inférieure au CPS : si les lettres sont moins visibles il est nécessaire de fixer les mots plus longtemps pour pouvoir les identifier. Mais elle ne permettrait pas de rendre compte d'une modification de l'effet *I-OVP* avec la taille des caractères, dans la mesure où ce phénomène ne peut être expliqué par le traitement en temps réel du mot.

Deux autres hypothèses, à dominante visuomotrice, ont été avancées pour expliquer les mécanismes déterminant la durée des fixations et la proportion de refixations lors de la lecture et plus particulièrement leurs variations dans le cas des effets *I-OVP* et *rOVP*. La première, avancée par Nuthman et al. ([2005, 2007](#)), explique ces deux phénomènes en termes d'**erreurs de visée** (pour la probabilité de refixation, voir aussi [O'Regan & Lévy-Schoen, 1987](#)). La diminution de la durée des fixations et dans une certaine mesure l'augmentation de la proportion de refixations observées près des bords du mot seraient, en réalité, dues à une petite proportion de saccades ayant été mal programmées et ayant « sur- » ou « sous-visé » le centre du mot (voir aussi [Engbert et al., 2005](#)). Ces saccades seraient suivies d'une fixation plus courte et rapidement corrigées par une refixation vers le centre du mot lorsque le traitement du mot n'est pas suffisamment avancé au moment de la programmation de la saccade. Vitu et al. ([2001; 2007](#)) ont, quant à eux, proposé une hypothèse en termes de **stratégies d'économie perceptive**. Selon cette hypothèse le système ne ferait pas « d'erreurs », mais tendrait, grâce à un processus automatique basé sur l'expérience perceptive, à rallonger les durées des fixations jugées les plus avantageuses pour la reconnaissance des mots, comme notamment, celles situées à une position proche du centre des mots. Selon les auteurs, le système se baserait sur des informations visuelles de bas niveau, telles que la longueur des mots et la position des espaces inter-caractères, pour estimer la position d'une fixation et décider d'en rallonger la durée ou pas. Ils précisent aussi que l'effet *rOVP* découlerait de l'effet *I-OVP*; à mesure que les durées des fixations sont déclenchées plus précocement, leur amplitude serait raccourcie du fait de l'effet de facteurs oculomoteurs mais aussi de par l'état moins avancé du traitement du mot fixé. Ces deux explications supposent donc que les effets *I-OVP* et *rOVP* reposent sur la capacité du système

à détecter la position du regard par rapport aux frontières entre les mots (ou les espaces blancs). Etant donné que la taille des caractères pourrait affecter ce processus de détection, une modification de la forme de ces deux phénomènes pour les petits en comparaison avec les grands caractères ne serait donc pas incompatible avec ces hypothèses.

7-1-2– Effet du site de départ et taille des caractères

Même s'il n'a été mis en évidence aucun effet consistant de la taille des caractères sur l'amplitude moyenne des saccades, il est possible qu'un effet apparaisse lorsque l'on analyse les mouvements oculaires de façon plus précise, en s'intéressant, par exemple, aux distributions des positions de fixation au sein des mots. Pour étudier l'influence de la taille des lettres sur cette variable, nous nous sommes appuyés sur les propriétés d'un phénomène mis en évidence par McConkie et al. (1988) : l'effet du site de départ. Cette effet montre que la distribution des positions d'atterrissage des saccades dans les mots est influencée par la distance de la fixation précédente par rapport au centre du mot cible (pour une revue voir [Vitu, 2011](#)). Les saccades partant d'un point de départ éloigné ont tendance à « sous-viser » le centre des mots, tandis que celles partant d'un site de départ proche ont tendance à atterrir vers la fin du mot, voire à le sauter. Lorsque l'on représente la position d'atterrissage moyenne des saccades en fonction de la position de leur site de départ (par rapport au centre du mot), l'on obtient une droite dont la pente est en moyenne de 0,5 lettre et qui ne varie que très légèrement en fonction de la longueur des mots ([McConkie et al., 1988](#)).

La plupart des théories du guidage oculaire lors de la lecture considèrent que le regard vise le centre d'un mot qui a été sélectionné comme cible en vision périphérique et que les variations des positions d'atterrissage des saccades en fonction du site de départ seraient dues à des **erreurs de gamme** ([McConkie et al., 1988](#)). Les erreurs de gamme seraient liées au fait que le système oculomoteur tend à effectuer des saccades d'amplitude moyenne et que, par conséquent, il aurait tendance à « sur-viser » les cibles plus proches et à « sous-viser » les cibles plus éloignées que cette distance moyenne ([Kapoula, 1985](#); [Kapoula & Robinson, 1986](#)). Cette erreur serait systématique et l'amplitude moyenne des saccades serait déterminée par la gamme des amplitudes des saccades effectuées durant la tâche. Lorsque l'on représente la relation linéaire entre la position du site de départ et celle de la position d'atterrissage, l'amplitude moyenne correspond à l'amplitude des saccades pour laquelle il n'y a pas d'erreur, c'est-à-dire, celles atterrissant au centre du mot (abscisse à l'origine). Selon cette

hypothèse, la taille des caractères, lorsqu'elle est « bloquée », c'est-à-dire lorsqu'elle ne varie pas au sein d'un ou plusieurs blocs d'essais consécutifs, comme c'est le cas dans notre expérience, ne devrait pas avoir d'impact, que ce soit sur la pente ou sur l'abscisse à l'origine des droites représentant l'effet du site de départ sur les positions de fixations initiales dans les mots (mesurées en lettres).

Vitu (2008) a proposé une hypothèse alternative selon laquelle les variations des positions d'atterrissage au sein des mots reflètent l'effet global et dépendent uniquement de la configuration visuelle globale formée par les mots sur la ligne de texte (Findlay, 1982, voir aussi Vitu, 1991c; Vitu & Blanes, 2009 ; en préparation). Le temps disponible pendant une fixation n'étant a priori pas suffisamment long pour permettre l'identification du mot en vision parafovéale (Chanceaux et al., 2012), ni même la programmation d'une saccade visant une position précise dans une configuration visuelle complexe (Vitu et al., 2006), le système n'aurait pas pour but de viser le centre d'un mot sélectionné comme cible en vision périphérique. Au contraire, il programmerait une saccade vers le centre de gravité pondéré d'un sous-ensemble des lettres situées à droite du point de fixation (ou à gauche pour les langues lues de droite à gauche), indépendamment des frontières entre les mots. La zone d'intégration spatiale serait de taille angulaire fixe, dans la mesure où l'excentricité du premier mot à droite du point fixé est constante. La position du centre de gravité dépendrait du nombre de lettres comprises dans cette zone, de l'emplacement des espaces inter-caractères et d'un facteur de pondération qui donnerait plus d'importance aux lettres les moins excentrées (i.e. la magnification fovéale). Dans ce cadre, l'effet du site de départ résulterait des variations de l'emplacement du centre de gravité de la zone critique selon la position de départ de l'œil sur la ligne de texte (voir Vitu et Blanes, 2009 ; en préparation). A partir de cette hypothèse, on peut prédire que la taille des caractères devrait avoir un effet sur l'effet du site de départ, mesuré en nombre de lettres (voir Figure 7.1). Lorsque la taille des caractères diminue, le nombre de lettres contenues dans la zone d'intégration devrait augmenter et les positions d'atterrissage des saccades devraient être plus décalées vers la fin des mots. Cet effet devrait aussi être plus marqué pour les sites de départ les plus proches du début du mot, car, dans ce cas, la quantité de lettres comprises dans la zone d'intégration et situées à droite du centre du mot est encore plus importante. La différence de position d'atterrissage entre les petits et les grands caractères dépendrait aussi du facteur de pondération attribué à chaque lettre en fonction de sa distance par rapport au site de départ. Notons néanmoins, qu'en l'absence à l'heure actuelle d'un modèle implémenté, il est difficile de faire des prédictions exactes car les

espaces blancs, leur taille et leur position par rapport à la fovéa sont censés jouer aussi un rôle.

Enfin, le modèle *Mr. Chips* proposé par Legge et al. (1997b) propose que la vitesse de lecture est principalement limitée par la taille de l'**empan visuel** et que les yeux se déplacent de manière à compléter de façon optimale l'information recueillie lors de la fixation précédente. Dans ce modèle, l'amplitude des saccades est donc principalement déterminée par les limites de l'empan visuel et par les informations lexicales. Un tel modèle suggère donc que d'éventuelles modifications de l'amplitude des saccades et de l'effet du site de départ seraient le reflet d'une modification de l'empan visuel. Rappelons néanmoins que les estimations de l'empan visuel par le même auteur suggèrent l'absence de variations de l'empan visuel (et donc vraisemblablement de l'amplitude des saccades) pour des tailles de lettres comprises entre $0,12^\circ$ et $0,5/1^\circ$ (Legge et al., 2007).

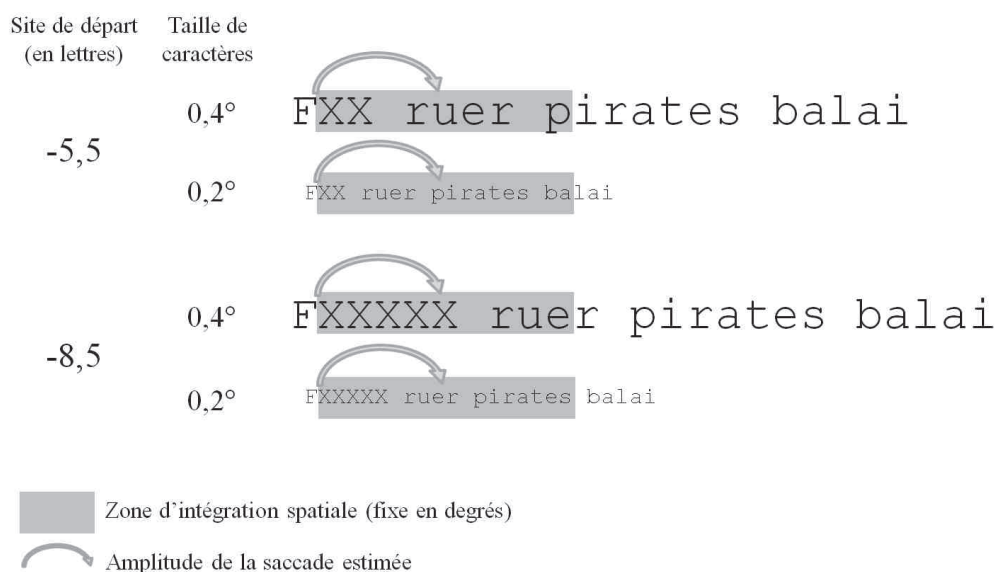


Figure 7.1 – Illustration d'une version simplifiée de l'hypothèse du site de départ en termes d'effet global proposée par Vitu (2008).

La position d'atterrissage des saccades (flèches grises) correspond ici au centre de gravité géométrique de la zone d'intégration (de taille angulaire fixe pour une excentricité angulaire donnée; rectangle gris). On voit que plus la taille des lettres est réduite et plus le site de départ est proche du début du mot, plus la quantité de lettres comprises dans la zone d'intégration et situées à droite du centre du premier mot est importante. Ceci a pour conséquence d'attirer le regard vers la fin du premier mot, voire sur le mot suivant. La lettre « F » représente le point de départ de la saccade (fixation).

7-1-3 – Variables étudiées

Pour cette expérience nous avons choisi d'étudier l'effet de la taille des caractères sur le comportement oculomoteur de participants sains, lors de la lecture de séquences de mots en vision centrale. Nous avons pris soin de choisir des tailles de caractères en théorie, légèrement supérieures au CPS afin de réduire la probabilité d'éventuels effets liés à la difficulté de traitement. Nous avons présenté aux participants, des groupes de trois ou six mots selon la condition. Nous avons manipulé la taille des caractères ($0,2^\circ$ ou $0^\circ,4^\circ$), la longueur (4 ou 6 lettres) et la catégorie de fréquence lexicale du premier mot (basse ou haute), ainsi que le décalage horizontal de la fixation initiale par rapport à l'espace devant le premier mot (de -1 à -9 lettres), appelé ici le site de départ (voir Figure 7.2). L'espace entre la barre de fixation et le premier mot était rempli par une chaîne de « x » que les participants avaient pour consigne d'ignorer. Leur tâche était de lire le groupe de mots présenté et d'indiquer s'ils avaient lu, ou non, un nom d'animal parmi les mots présentés. Contrairement aux études passées, l'analyse des données n'a pas porté sur la mesure globale de l'amplitude des saccades et la durée des fixations, mais elle s'est attachée à investiguer les possibles variations du comportement oculomoteur inter et intra mot (i.e. analyses locales) en fonction de la taille des caractères et des autres variables manipulées. L'analyse de la distribution des positions initiales de fixation en fonction de la taille des caractères, du site de départ mais aussi de la longueur des mots, nous a permis de tester dans un premier temps si l'effet du site de départ était sensible à la taille des caractères. Dans un second temps, les variations induites de la position initiale de fixation dans le mot, à partir de la manipulation du site de départ, nous ont permis d'examiner les modulations éventuelles des effets *I-OVP* et *rOVP* pour la durée des fixations et la proportion des refixations respectivement, en fonction de la taille des caractères.



Figure 7.2 – Exemples de trois conditions de site de départ (-9, -5 et -1 lettres par rapport à l'espace devant le mot; indiqué par la ligne pointillée verticale) pour les petits et les grands caractères. L'espace entre la barre de fixation et le premier mot était remplie par une chaîne de « x » de longueur variable en fonction de la condition de présentation. Pour égaliser la taille angulaire de la ligne de mots entre les petits et les grands caractères, trois mots supplémentaires étaient présentés dans la condition « petits caractères », la longueur du dernier mot variant en fonction de la condition de décalage horizontal.

7-2 – METHODE

7-2-1 – Participants

Quatorze individus naïfs ont participé à l'expérience en échange d'une compensation financière de 30 euros. Tous étaient des étudiants de l'Université d'Aix-Marseille (âge compris entre 18 et 26 ans), de langue maternelle française et ayant une vision normale non corrigée.

7-2-2 – Matériel

Un total de 4914 mots répartis sur 1086 essais ont été présentés aux participants (pour la liste de mots, voir Annexe 4). Seule la fréquence du premier mot de chaque groupe, dit « mot cible », a été contrôlée, à partir des données obtenues grâce à la base « Lexique 3 » (www.lexique.org; voir [New et al., 2001](#)). La fréquence moyenne des mots cibles était de 648 occurrences par million (ou opm) et différente pour chaque condition de longueur (4 ou 6 lettres) et de fréquence (basse ou haute fréquence). La fréquence moyenne des mots de 4 lettres était de 1143 opm et celle des mots de 6 lettres de 42 opm. La limite entre les mots de

basse et haute fréquence avait été fixée à 20 opm, ce qui nous a donné une moyenne de 8,89 opm pour les mots de basse fréquence et de 1301 opm pour les mots de haute fréquence. Dans la condition « grands caractères », seuls trois mots étaient présentés, ils comportaient respectivement 4, 7 et 5 ou 6, 7 et 3 lettres selon la condition de longueur du premier mot. Dans la condition « petits caractères », 6 mots étaient présentés, les 3 premiers suivant les mêmes règles d'appariement en termes de longueur que dans la condition « grands caractères » et les 3 derniers utilisés pour égaliser la taille angulaire de la ligne de texte entre les petits et les grands caractères : les quatrième et cinquième mots comportaient toujours 6 et 8 caractères respectivement, tandis que la longueur du sixième mot variait en fonction de la position du site de départ ; elle était de 3 lettres pour la condition « -1 » et allait jusqu'à 11 lettres pour la condition « -9 ». La stimulation au cours d'un essai était donc composée d'une chaîne de « x » (5 à 9 caractères pour la petite taille et 3 à 11 caractères pour la grande taille) et d'un groupe de 3 ou 6 mots de longueur variable suivant le site de départ (voir Figure 7.2). Chacun des 10 blocs d'essais comportait un total de 88 ou 92 essais, 80 essais tests, et 12 ou 9 essais de remplissage selon la taille, petite ou grande, des caractères. Dans ces essais de remplissage, l'un des mots était un nom d'animal et servait la tâche de recherche; de façon équiprobable, il correspondait à l'un des trois mots dans la condition grand caractères, et à l'un des trois premiers mots ou le groupe des trois derniers mots dans la condition petit caractères. Deux listes de 11 essais ont été construites pour les deux blocs d'entraînement.

7-2-3 – Plan expérimental

Nous avons manipulé quatre facteurs dans notre expérience :

- la taille des caractères, qui comprenait deux niveaux : « petite » (largeur du x = $0,2^\circ$, espace caractère = $0,3^\circ$) ou « grande » (x = $0,4^\circ$, espace caractère = $0,6^\circ$),
- le site de départ qui comprenait cinq niveaux correspondant à -9, -7, -5, -3 et -1 lettres par rapport à l'espace devant le premier mot (voir Figure 7.2),
- la longueur du premier mot (4 ou 6 lettres),
- la catégorie de fréquence lexicale du premier mot (haute ou basse).

Les conditions de présentation étaient organisées en « carré latin » ; chaque mot était présenté une seule fois et dans des conditions de présentation différentes pour chaque participant, mais sur l'ensemble des participants, chaque mot était vu au moins une fois dans chaque condition de taille et de site de départ combinée. La condition « taille de caractères » était « bloquée » et

son ordre de passation était contrebalancé au travers des participants : les sept premiers participants passait les cinq blocs correspondant à la condition « petits caractères » en premier, suivis des cinq blocs en « grands caractères », et inversement pour les sept derniers participants.

7-2-4 – Procédure

La durée de l'expérience était d'environ trois heures. Le dispositif d'installation des participants était le même que dans la première expérience présentée au Chapitre 5. Un essai se déroulait de la façon suivante :

(1) affichage de deux barres verticales sur l'axe horizontal central de l'écran, à une distance de 2.6° par rapport au bord gauche de l'écran. Les participants avaient pour consigne de fixer l'espace entre ces deux barres jusqu'à l'apparition du mot.

(2) lorsque l'ordinateur connecté à l'oculomètre détectait une fixation d'au moins 16 millisecondes (soit une trame de l'écran) dont la position moyenne était comprise dans une région rectangulaire verticale de $0,27^\circ \times 1.33^\circ$ autour du point central de la barre de fixation, la fixation était considérée comme valide, ce qui déclenchait la disparition de la barre et l'apparition simultanée de l'ensemble de la stimulation. Les mots restaient affichés jusqu'à ce que l'œil ait fixé le dernier mot (afin de s'assurer que l'ensemble des mots présentés était lu) et que le participant ait appuyé sur le bouton réponse.

(3) une fois que le participant avait donné sa réponse, par un appui sur le bouton gauche s'il avait vu un nom d'animal ou droit s'il n'en avait pas vu, les mots disparaissaient et un nouvel essai était déclenché.

7-2-5 – Appareillage

Comme dans l'expérience présentée au Chapitre 5, l'oculomètre utilisé était un Dual-Purkinje-Image Eye-Tracker de 5ème génération (Ward Electro-Optics, Inc), qui mesure les mouvements de l'œil droit avec une précision de 10 minutes d'arc ([Cornsweet & Crane, 1973](#)). Les méthodes de calibrage et d'affichage des stimuli étaient les mêmes que lors de la première expérience. Les mots étaient affichés le long de l'axe horizontal central de l'écran, en blanc sur fond noir, dans la police de caractère « Courier ». L'écran était situé à une distance de 85 cm de l'œil des participants. La salle était légèrement éclairée par une lampe située à côté de l'expérimentateur.

7-2-6 – Sélection des données

Le fichier comprenant l'ensemble des données comportait 110273 lignes, chaque ligne correspondant à une fixation. Pour notre analyse, nous avons, dans un premier temps, sélectionné uniquement les essais correspondant aux cas où (1) les participants avaient donné une réponse correcte (le pourcentage moyen de bonnes réponses étant de 98,8%), (2) l'essai correspondait à un essai test, c'est-à-dire ne comportant pas de nom d'animal, (3) les mots étaient apparus durant une fixation et non pas une saccade ou un clignement, (4) la position du regard au moment de l'apparition des mots étaient située dans une zone de 1° autour de la barre de fixation et (5) le temps de la fixation sur la barre avant le déclenchement de la première saccade était au moins de 80 ms, ceci permettant d'éviter les saccades anticipatrices. Au terme de cette première sélection, nous disposions de 100208, soit 97,13% des échantillons initiaux. Dans un second temps, nous avons sélectionné uniquement les saccades initiales, c'est-à-dire celles partant de la barre de fixation après l'apparition des mots. Nous avons, en plus, veillé à ce que (1) la saccade initiale soit une saccade progressive, (2) la fixation suivante ne comporte pas de clignement des yeux et (3) que le participant n'ait pas appuyé sur le bouton réponse durant la saccade ou la fixation qui suivait. Après cette deuxième sélection, il nous restait 9278 échantillons, soit 8,4% des échantillons initiaux.

7-2-7 – Méthodes d'analyse des données

7-2-7-1 – Effets sur la métrique des saccades

Nous avons tout d'abord analysé l'effet du site de départ de la saccade (position réelle de l'œil) sur **la proportion de sauts du mot test et de refixations** sur la chaîne de « x » ainsi que sur la **position d'atterrissage des saccades initiales** (exprimée en nombre de lettres par rapport au centre du premier mot), en fonction de la taille des caractères et de la longueur des mots. Des analyses préliminaires (non présentées ici) n'ayant révélé aucun effet de la fréquence lexicale du premier mot sur l'amplitude des saccades, cette variable n'a pas été prise en compte dans les analyses de la métrique des saccades. Notons dès à présent que la valeur du site de départ utilisée était la position réelle de l'œil au moment du déclenchement de la saccade. C'était donc une variable continue, allant de -12,5 à -2,5, que nous avons catégorisée par « pas » d'une lettre afin de pouvoir l'utiliser comme variable indépendante discrète.

Seul l'effet du site de départ sur la position d'atterrissage des saccades a été testé statistiquement. Les études classiques de l'effet du site de départ ont pour habitude d'analyser uniquement les positions des saccades atterrissant dans les limites du mot « cible ». Nous avons choisi, ici de prendre en compte l'ensemble des saccades initiales partant de la barre de fixation (soit 6576 échantillons), tout d'abord parce que cette méthode permet d'inclure les cas de sauts de mots et de refixations sur la barre, mais aussi, parce que, comme le suggèrent les résultats de McConkie et al. (1988), il semble y avoir une continuité dans les distributions des positions d'atterrissage qui s'étend au-delà des limites du mot (voir Figure 2.14). Nous avons donc étudié les distributions des positions d'atterrissage des saccades séparément pour chaque participant et pour chaque condition (taille x longueur x position de départ) et testé l'effet des trois facteurs sur la moyenne de ces distributions. Cette analyse statistique comprenait trois étapes principales :

(1) Nous nous sommes d'abord assuré que les échantillons étaient normalement distribués en réalisant des tests de Shapiro-Wilk pour chaque sujet et chaque condition séparément (Shapiro & Wilk, 1965). Parmi les 530 distributions à estimer, 60 n'étaient pas normales ($p_{\text{shapiro}} < 0,05$) et ont donc été écartées de l'analyse.

(2) Nous avons ensuite ajusté les distributions au moyen de la fonction « *fitdistr* » comprise dans le package « MASS » du logiciel R qui utilise la méthode d'estimation du maximum de vraisemblance, et donne la moyenne et l'écart-type de la distribution estimée (Venables & Ripley, 2002; R Development Core Team, 2008).

(3) Enfin, nous avons réalisé un modèle à effets mixtes LMM (LMM pour *Linear Mixed effects Model*, voir Chapitre 6) sur les moyennes estimées des 470 distributions ajustées, en utilisant la fonction *lme* du package NLME (Pinheiro & Bates, 2000). Nous avons entré la taille des caractères et la longueur des mots en tant que facteurs catégoriels, la position de départ comme facteur continu, et la variable « sujet » comme facteur aléatoire. Des analyses préliminaires ont révélé que seule l'interaction entre la position du site de départ et la taille des caractères était significative et que le modèle ne comprenant que cette interaction approchait le mieux les données. Nous avons donc inclus uniquement cette interaction au modèle.

7-2-7-2 – Effets sur la durée des fixations

Nous avons ensuite analysé la proportion de refixations sur le premier mot, la durée de la première fixation (quelle que soit le nombre de fixations) sur ce mot, et lorsque le mot était refixé, la durée de la première et de la deuxième fixation en fonction de la position initiale de fixation (position de la première fixation) par rapport au centre du mot, mesurée en lettres. Pour ces analyses, nous avons sélectionné les fixations suivant la première saccade et atterrissant directement sur le premier mot. Après élimination des données marginales (durée de fixation supérieure à 600 ms, soit 55 échantillons), nous avons obtenu un total de 6576 échantillons. La position initiale de fixation sur le mot était une variable continue (allant de -2 à +2 pour les mots de 4 lettres et de -3 à +3 pour les mots de 6 lettres), qui a été catégorisée pour les représentations graphiques, mais laissée telle quelle pour les analyses statistiques.

Les effets des variables indépendantes manipulées (taille des caractères et longueur et fréquence du mot) et de la position de la fixation initiale dans le mot (définie a posteriori et résultant essentiellement de la manipulation du site de départ) sur **la durée des fixations** ont été testés grâce à un modèle à effets mixtes linéaire (LMM avec la fonction lme, [Pinheiro & Bates, 2000](#)). Pour la **proportion de refixations**, en revanche, qui est représentée par une variable binaire (1=oui ou 0=non), nous avons utilisé un modèle à effets mixtes généralisé (GLMM pour *Generalized Linear Mixed effects Model*) réalisé grâce à la fonction lmer du package nlme ([Bolker et al., 2009](#); [Zuur et al., 2009](#), et voir Chapitre 5). Pour les raisons expliquées dans le Chapitre 5, les effets donnés par ce type de modèle sont en unités logit (y) et doivent être transformés en probabilités (p) à partir de la formule : $p = 1/(1+\exp^{-y})$. De plus, pour conserver un modèle de régression linéaire tout en rendant compte de la forme en cloche des courbes *I-OVP* et *rOVP* (voir Figure 7.3), nous avons aussi entré dans les deux types de modèles (LMM et GLMM) une **composante quadratique** pour rendre compte de l'effet de la variable de position de fixation (PX). Le coefficient obtenu pour l'effet du facteur PX^2 représente la relation linéaire entre la variable indépendante et le carré de PX. La relation entre la variable dépendante et la position du regard dans le mot sera donc une courbe gaussienne représentée par une formule du second degré de la forme : $y = \text{coeff}_1*(PX)^2 + \text{coeff}_2*(PX) + y_0$. (où y_0 est le coefficient à l'ordonnée à l'origine). Le coefficient correspondant au facteur PX^2 renseigne surtout sur l'inflexion de la courbe; plus il est proche de 0, plus les courbes sont « aplaties », s'il est positif la courbe est en forme de « U », et s'il est négatif, la courbe est en forme de « U inversé ». Le coefficient correspondant

à la variable PX, renseigne quant à lui, surtout sur la position du maximum (ou du minimum) de la courbe par rapport à la valeur de référence (ici $PX=0$, le centre du mot) ; plus il est élevé, plus la courbe est décalée vers des valeurs positives de PX, c'est-à-dire à droite du centre du mot. Enfin, la valeur à la référence indique la hauteur du maximum/minimum de la courbe.

7-3 – RESULTATS

7-3-1 – Amplitude et position d'atterrissage des saccades

7-3-1-1 – Refixations et sauts de mots

La Figure 7.3 représente le pourcentage de refixations sur la chaîne de « x » (à gauche) et le pourcentage de saut du premier mot (à droite) en fonction du site de départ de la saccade, pour les mots de 4 (en haut) et de 6 lettres (en bas), et pour les petits (en bleu) et les grands caractères (en mauve). Les graphiques montrent une diminution rapide du pourcentage de refixations au fur et à mesure que le site de départ se rapproche du centre du mot. De manière presque symétrique, le pourcentage de sauts de mots augmente lorsque le site de départ se rapproche du mot. L'augmentation de la taille des caractères semble avoir pour effet d'augmenter légèrement la proportion des refixations, en particulier pour les sites de départs les plus éloignés du mot. La probabilité de saut de mot montre un effet de la taille beaucoup plus marqué ; les mots sont plus souvent sautés dans la condition « petits caractères » et cette différence augmente lorsque le site de départ se rapproche du centre du mot. Ces deux graphiques suggèrent donc que l'amplitude des saccades (en lettres) est plus importante et que leur position d'atterrissage est plus éloignée pour les petits que pour les grands caractères.

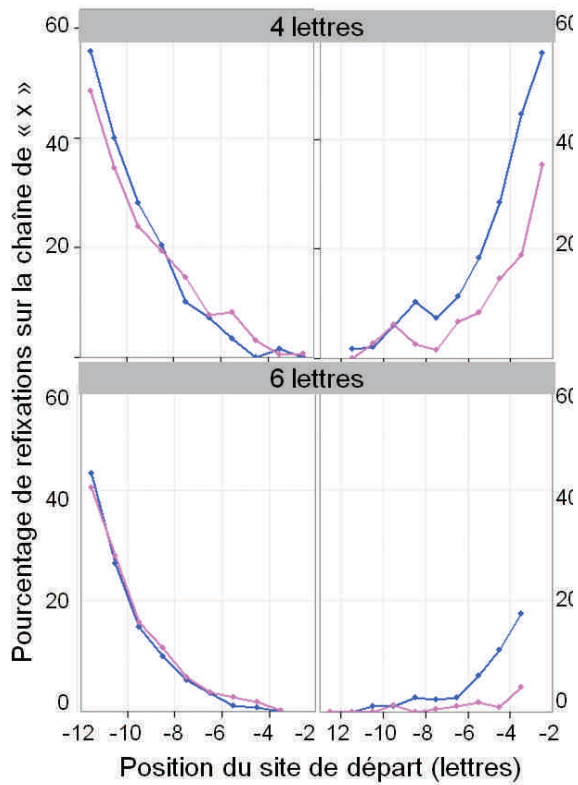
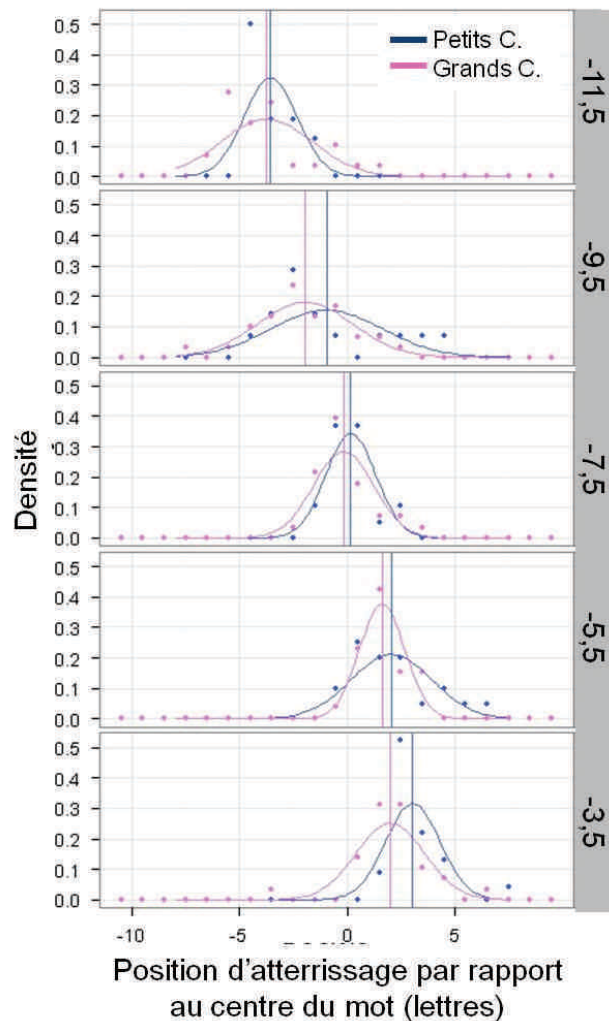


Figure 7.3 – Pourcentage de refixations sur la chaîne de « x » (à gauche) et de sauts du premier mot (à droite) en fonction de la position du site de départ, pour les mots de 4 (en haut) et 6 lettres (en bas). Le pourcentage de refixation diminue et le pourcentage de saut de mots augmente au fur et à mesure que le site de départ se rapproche du début du mot. L'effet du site de départ sur le pourcentage de saut de mots paraît plus marqué pour les petits (en bleu) que pour les grands caractères (en mauve), suggérant des positions d'atterrissage plus éloignées pour les petits caractères.

Figure 7.4 – Distributions des positions d'atterrissage en fonction de cinq positions du site de départ (exprimé en lettres par rapport au centre du mot) pour le Sujet 1 et les mots de 6 lettres. Les points représentent les valeurs moyennes catégorisées par unité de position d'atterrissage et les courbes sont les gaussiennes ajustées à partir de la position d'atterrissage (non catégorisée). Les saccades ont tendance à atterrir vers le début du mot pour les positions de départ éloignées et vers la fin du mot dans les conditions où le site de départ est proche. Le pic de la courbe (marqué par les droites verticales) se décale plus vers la fin des mots pour les petits (en bleu) que pour les grands caractères (en mauve).



7-3-1-2 – Effet du site de départ

La Figure 7.4 illustre un exemple d'ajustement effectué sur le participant 1 pour cinq positions de point de départ et pour les mots de 6 lettres. Les points du graphique ont été ajoutés à titre indicatif ; ce sont des valeurs moyennées par « pas » d'une lettre alors que les densités ont été estimées à partir d'une variable continue comprenant, environ une vingtaine d'échantillons par condition et par participant. C'est la raison pour laquelle ils sont parfois assez éloignés des courbes gaussiennes, qui sont, elles plus proches de la distribution réelle des données. Les distributions montrent un effet caractéristique du site de départ ; le regard a tendance à atterrir vers le début du mot lorsque le site de départ est éloigné, puis les distributions se décalent progressivement vers la fin du mot lorsque le site de départ se rapproche du début du mot. Comme le suggéraient les graphiques représentant le pourcentage de sauts de mots (Figure 7.3 droite), ce décalage paraît plus important pour les petits que pour les grands caractères.

Les effets fixes du LMM réalisé sur les distributions des positions d'atterrissage des saccades initiales sont présentés au Tableau 7.1 et à la Figure 7.7. Nous avons choisi comme valeurs à l'origine : taille de caractères = « petite », longueur des mots = « 4 lettres » et site de départ = 0. Le modèle montre un effet significatif de tous les facteurs et interactions inclus dans l'analyse. Le coefficient correspondant au site de départ (0,63) nous indique la pente de la droite de régression lorsque les facteurs catégoriels sont à l'ordonnée à l'origine (droite mauve, panneau de gauche). Cela signifie donc que la position d'atterrissage des saccades augmente d'un peu plus d'une demi-lettre chaque fois que le site de départ se rapproche d'une lettre du centre du mot. Cette augmentation est un peu moins importante pour la grande taille de caractères (pente = $0,63 - 0,12 = 0,51$) que pour la petite. L'effet simple de la longueur des mots indique que les saccades atterrissent en moyenne moins loin dans les mots de 6 que de 4 lettres, mais l'absence d'interaction avec la position de départ (non présenté ici) suggère que cet effet est constant quel que soit le site de départ.

	Coefficient	Ecart-type	P
Ordonnée à l'orig	5.24	0.28	0 *
Site de départ (lettres)	0.63	0.02	0 *
Taille (Grands C.)	-1.23	0.18	0 *
Longueur (6 lettres)	-0.38	0.07	0 *
Site de départ : Taille (G)	-0.12	0.02	0 *

Tableau 7.1 : Effets fixes prédits par le *LMM* réalisé sur les moyennes des distributions des positions d'atterrissage sur le premier mot. Les deux points « : » représentent les interactions et l'astérisque pointe les effets significatifs. L'ordonnée à l'origine correspond aux valeurs : Site de départ=0, Taille= « petits caractères » et longueur=4L.

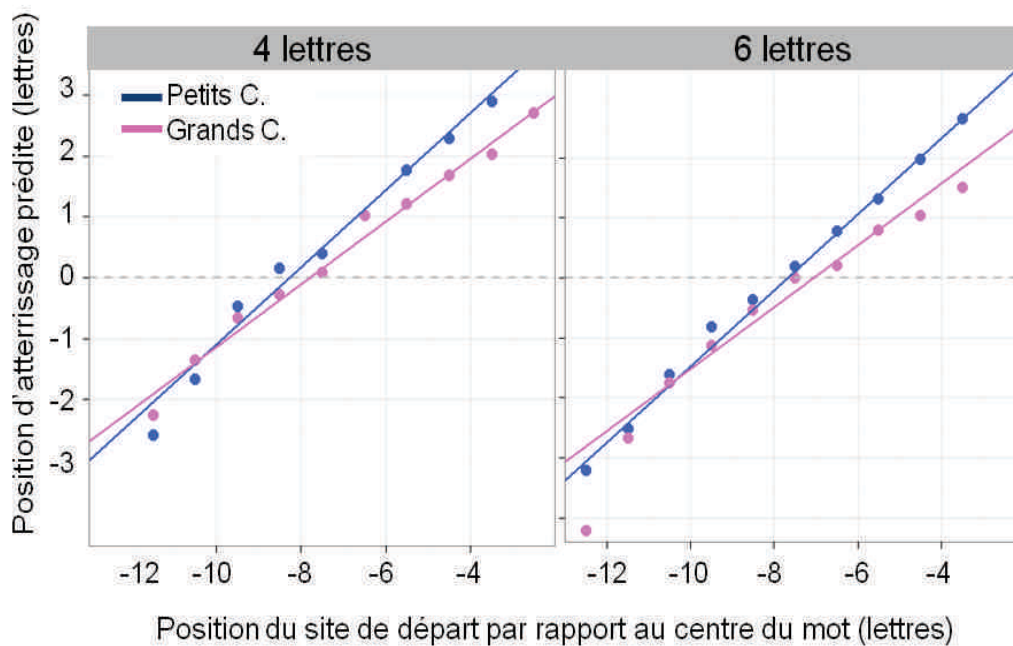


Figure 7.5 : Représentation graphique des droites de régressions prédites par le *LMM*, séparément pour les mots de 4 (à gauche) et 6 lettres (à droite). Les points représentent les valeurs moyennes des moyennes estimées des distributions pour chaque condition. La pente de l'effet du site de départ est plus importante pour les petits (en bleu) que pour les grands caractères (en mauve).

7-3-2 – Durées de fixation et de la probabilité de refixation : effets I-OVP et rOVP

Cette deuxième partie de l'analyse concerne la durée des premières fixations et le proportion de refixations **quel que soit le nombre de fixations** que les participants aient effectuées sur le mot. Ceci est important à préciser car, dans la troisième partie de l'analyse, nous nous intéresserons uniquement aux cas où il y a eu strictement deux fixations sur le mot.

7-3-2-1 – Valeurs moyennes et représentation des données brutes

La Figure 7.6 représente les valeurs moyennes de la durée des premières fixations (a) et du pourcentage de refixations (b), en fonction de la position de fixation initiale par rapport au centre du premier mot, séparément pour les deux longueurs de mots (4 lettres à gauche et 6 lettres à droite) et les deux catégories de fréquence lexicale (basse en haut et haute en bas), et pour les deux tailles de caractères (petite en bleu et grande en mauve). La valeur moyenne des durées de fixation était de 255 ms. Elle était un peu plus importante pour les mots de 6 lettres (256 ms) que pour les mots de 4 lettres (254 ms) et pour les mots de basse (261 ms) que de haute fréquence (253 ms). La durée moyenne des fixations était aussi plus longue dans la condition petit caractères (268 ms) que dans la condition « grands caractères » (242 ms). Les courbes représentant les variations de la durée moyenne de fixation en fonction de la position de fixation initiale (Figure 7.6a) montrent une allure en forme de « U inversé » caractéristique de l'effet *I-OVP*, avec un maximum proche du centre du mot (représenté par la droite en pointillés). Les courbes bleues, correspondant à la petite taille de caractères ont une hauteur plus importante et semblent avoir une pente moins marquée que les courbes mauves correspondant à la grande taille de caractères.

Le pourcentage moyen de refixation était de 26 %, il était plus important pour les mots de 6 (32 %) que de 4 lettres (20 %) ainsi que pour les mots de basse (27 %) que de haute fréquence (26 %). Il était aussi plus important pour les grands (30 %) que pour les petits caractères (22 %). Les courbes représentant la probabilité de refixer le mot en fonction de la position de fixation (Figure 7.6b), sont en forme de « U », caractéristique de l'effet *OVP* pour la refixation, avec un minimum situé le plus souvent à gauche du centre du mot. On observe ici une hauteur et pente moins importantes dans la condition « petits caractères » en comparaison avec la condition « grands caractères ». Les tendances observées sur les graphiques ont été testées statistiquement grâce à des modèles de régression linéaire.

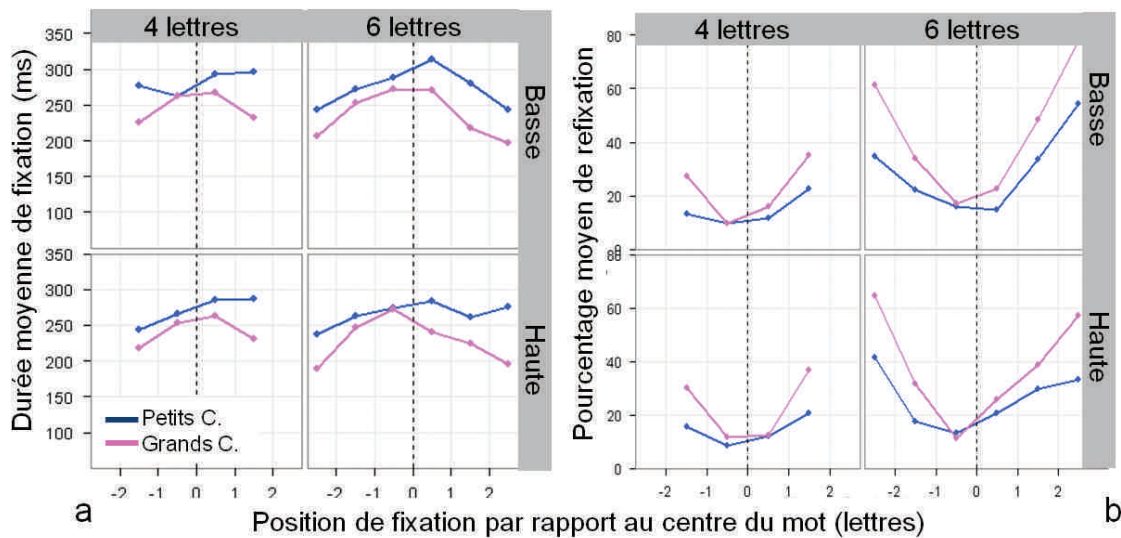


Figure 7.6 – Moyennes des durées de première fixation (a) et du pourcentage de refixation (b) en fonction de la position de la fixation initiale dans le premier mot, pour les différentes conditions de taille (petite en bleu, grande en mauve), de fréquence et de longueur de mots. Les courbes représentant les durées de fixation ont une forme en « U inversé » caractéristique de l’effet *I-OVP* et celles représentant le pourcentage de refixation, une forme en « U », caractéristique de l’effet *OVP* pour la refixation. Les deux effets semblent plus marqués, avec une pente plus importante, pour la grande que pour la petite taille de caractères.

7-3-2-2– Résultats des modèles statistiques

Pour les modèles réalisés sur la durée des premières fixations et sur la proportion de refixation, nous avons testé les effets simples de la variable « position de première fixation sur le mot », avec une composante linéaire (PX) et une composante quadratique (PX²), ainsi ceux que de la taille des caractères, de la fréquence et de la longueur des mots sur la durée des fixations et la probabilité de refixation. Pour tester l’influence de la taille des caractères en fonction des différentes conditions, nous avons aussi inclus les interactions entre le facteur « taille » et les deux autres facteurs catégoriels (« fréquence » et « longueur ») ainsi qu’avec la composante PX². Enfin nous avons inclus une interaction entre la longueur des mots et la composante PX². Les valeurs des différents facteurs à l’ordonnée à l’origine étaient : site de départ = 0, taille de caractères = « petite », fréquence = « basse » et longueur des mots = « 4 lettres ». Il est à noter que par souci de simplicité, nous avons choisi de ne pas étudier les interactions entre la composante linéaire du facteur PX et les autres facteurs, c’est pourquoi la position du pic des courbes prédites par le modèle ne varie pas en fonction de la condition de présentation.

Les effets fixes du LMM réalisé sur **la durée des premières fixations** sont rapportés dans le Tableau 7.2. La Figure 7.7a représente les courbes *I-OVP* prédites pour les mots de 6 lettres et de basse fréquence. Tous les effets testés, à l'exception de l'effet de la longueur des mots et de l'interaction entre la taille des caractères et la fréquence, sont significatifs. La valeur du coefficient à l'origine (296,68) représente la durée moyenne de fixation (en ms) prédite lorsque les trois facteurs catégoriels sont à l'ordonnée à l'origine. Le coefficient correspondant aux facteurs catégoriels représente la valeur à ajouter à l'ordonnée à l'origine pour obtenir la durée de fixation prédite pour le deuxième niveau de chaque facteur ; le modèle prédit donc des durées de fixations plus courtes pour les grands que pour les petits caractères (296,68-29,9=266,78ms ; voir pic des courbes à la Figure 7.7a), et pour les mots de haute fréquence (286,68ms) que de basse fréquence. Le coefficient négatif correspondant au facteur PX^2 (-11,01), indique que la courbe est en forme de « U inversé », et donc que la durée des fixations diminue à mesure que la fixation s'éloigne de la position correspondant au maximum. Le coefficient correspondant au facteur PX indique la position du maximum de la courbe par rapport au centre du mot ; une valeur positive (ici 5,28) signifie que le pic est situé à droite du centre. Parmi les interactions testées, trois ressortent significatives. On observe tout d'abord une interaction négative (-2,57) entre le facteur « taille » et le facteur PX^2 , qui confirme la tendance observée sur les graphiques de moyennes, c'est-à-dire, une pente plus importante pour les grands (coefficient = -32,47) que pour les petits caractères (coefficient = -29,9). L'interaction positive entre la longueur des mots et le facteur PX^2 (5,28) signifie que les pentes sont moins importantes pour les mots de 6 (-24,62) que de 4 lettres (-29,9). Enfin, l'interaction entre le facteur taille et la longueur des mots montre que l'augmentation de la taille des caractères diminue plus les durées de fixation pour les mots courts (-29,9) que pour les mots longs (-18,34) (lorsque le regard est au centre des mots)

	Coefficient	Ecart-type	P
Ordonnée à l'orig.	296.68	6.35	0 *
PX ²	-11.01	0.78	0 *
PX	5.28	0.77	0 *
Taille (Grands c.)	-29.9	3.27	0 *
Fréquence (Haute)	-10	2.56	.10 ⁻⁴ *
Longueur (6 lettres)	-1.34	30.5	0.7
Taille (G) : PX ²	-2.57	0.58	0 *
Taille (G) : Fréquence (H)	3.74	3.5	0.3
Taille (G) : Longueur (6L)	11.56	3.62	.10 ⁻³ *
PX ² : Longueur (6)	5.28	0.75	0 *

Tableau 7.2 – Effets fixes prédits par le LMM effectué sur les durées de première fixation. Les interactions sont représentées par deux points « : » et les effets significatifs sont marqués par un astérisque « * ». Les valeurs des facteurs à l'ordonnée à l'origine sont : site de départ = 0, taille de caractères = « petite », fréquence = « basse » et longueur des mots = « 4 lettres ».

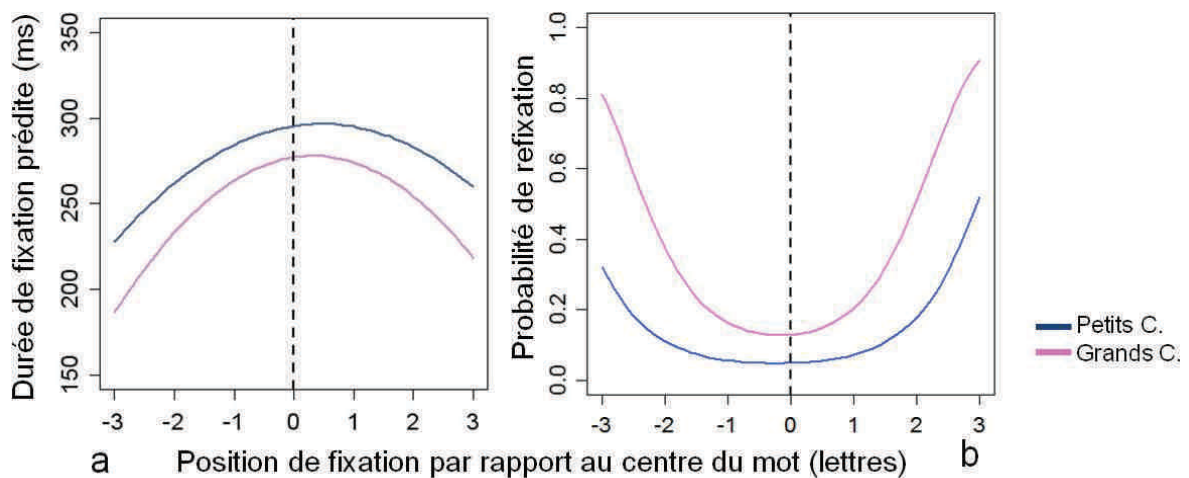


Figure 7.7 – Courbes prédites par les modèles de régression effectués sur la durée de première fixation (a) et sur la proportion de refixation (b) en fonction de la position de fixation dans le mot pour les mots de 6 lettres et de basse fréquence. Les courbes *I-OVP* pour les durées de fixation et les courbes *rOVP* pour la refixation montrent un effet plus marqué, avec des pentes plus importantes pour la grande (en mauve) que pour la petite taille de caractères (en bleu).

Les effets fixes du GLMM réalisé sur la **proportion de refixation** sur le premier mot sont présentés au Tableau 7.3 et à la Figure 7.7b (mots de 6 lettres, basse fréquence). Rappelons que les coefficients de la première colonne du tableau sont en unités logit. Lorsqu'on les transforme en probabilités, leur sens de variation est conservé mais leur valeur est modifiée. Les probabilités correspondant aux effets simples des facteurs catégoriels sont indiquées dans la dernière colonne du tableau. Les résultats indiquent une probabilité de refixation à l'ordonnée à l'origine plus importante pour les grands (0,1) que pour les petits caractères (0,05) ainsi que pour les mots de 6 lettres (0,11, ici effet significatif) que pour les mots de 4 lettres (0,05). Les courbes représentant la probabilité de refixation en fonction la position de première fixation dans le mot sont en forme de « U » (coefficient de PX^2 positif), avec un minimum proche du centre du mot (légèrement à gauche cette fois-ci, car le coefficient de PX est négatif). Cette fois-ci, la différence entre les petits et les grands caractères est assez légère. On observe cependant que la probabilité de refixation au centre du mot est moins importante et que la pente de l'effet est moins marquée pour les petits (coefficient en logit = 0,44) que pour les grands caractères (0,44+0,09=0,53). Les mots de 6 lettres sont plus souvent refixés (probabilité à l'ordonnée à l'origine = 0,11) que les mots de 4 lettres (probabilité = 0,05) mais ce facteur n'interagit pas avec la position de fixation. Enfin, notons que l'on n'observe aucun effet de la fréquence des mots que ce soit sur le pic ou la pente des courbes.

	Coeff. (logit)	Ecart-type	P	Probabilité
Ordonnée à l'orig.	-2.88	0.34	0 *	0.05
PX^2	0.44	0.03	0 *	
PX	-0.24	0.02	0 *	
Taille (Grands c.)	0.7	0.14	8.10^{-7} *	0.10
Fréquence (Haute)	-0.13	0.1	0.21	0.05
Longueur (6 lettres)	0.81	0.14	9.10^{-9} *	0.11
Taille (G) : PX^2	0.09	0.03	$1.6.10^{-3}$ *	
Taille (G) : Fréquence (H)	0.01	0.14	0.97	0.05
Taille (G) : Longueur (6L)	-0.31	0.14	0.03 *	0.04
PX^2 : Longueur (6)	-0.14	0.03	$1.9.10^{-3}$ *	

Tableau 7.3 – Effets fixes prédits par le GLMM effectué sur la probabilité de refixation sur le premier mot. Les coefficients indiqués dans la première colonne sont en unités logit et ont été transformés en probabilités (dernière colonne) par la formule $p=1/(1+\exp^{-(\text{intercept}+y)})$. Les interactions sont représentées par deux points « : » et les effets significatifs marqué par un astérisque « * ». Les valeurs des facteurs à l'ordonnée à l'origine sont : site de départ = 0, taille de caractères = « petite », fréquence = « basse » et longueur des mots = « 4 lettres ».

7-3-2 – Durées des fixations dans le cas de deux fixations consécutives sur le mot

Afin de préciser la généralité de l'effet I-OVP pour la durée des fixations, nous avons choisi de comparer l'effet de ces quatre facteurs (« taille », « position », « fréquence » et « longueur ») sur les durées de chaque fixation uniquement dans les cas où les participants effectuaient **deux fixations successives sur le mot** (1570 échantillons). Etant donné que la position de la deuxième fixation ne montrait aucun effet significatif sur la durée de la deuxième fixation, nous avons analysé les variations des durées de chacune des deux fixations en fonction de la position de fixation initiale (position de la première fixation). L'objectif, visé, était donc de vérifier l'effet I-OVP pour la durée de la première fixation, et d'autre part un échange entre les durées de la première et de la seconde fixation lorsqu'elles sont toutes deux analysées en fonction de la position initiale du regard dans le mot (O'Regan & Lévy-Schoen, 1987; voir aussi [Vitu et al., 2001](#)). Nous avons donc réalisé les mêmes *LMM* que ceux présentés précédemment, sur les durées de chacune des deux fixations. Les résultats obtenus pour les effets fixes sont indiqués au Tableau 7.4 et représentés graphiquement à la Figure 7.8 (mots de 6 lettres, basse fréquence).

Les effets observés sur la durée de la **première fixation** ressemblent à ceux obtenus lorsque l'on avait sélectionné l'ensemble des premières fixations. Les courbes des durées de fixation en fonction de la position du regard dans le mot sont en forme de « U inversé » (coefficient $PX^2 = -3,2$), avec un maximum légèrement à droite du centre (coefficient $PX = 3$). Néanmoins, l'effet est moins important que dans l'analyse précédente. L'interaction entre le facteur PX^2 et la taille des caractères est aussi maintenue ($-2,38$), ce qui signifie que les pentes des courbes sont toujours plus importantes pour les grands que pour les petits caractères. En revanche, la durée prédite à l'ordonnée à l'origine (219,4 ms) est bien moins importante que celle obtenue précédemment (296,68 ms) et surtout, elle n'est significativement influencée par aucun des trois facteurs catégoriels (taille, fréquence ou longueur de mot). De plus, l'interaction entre la composante PX^2 et la longueur des mots est moins importante et non significative.

	1ère fixation			2ème fixation		
	Coefficient	Ecart-type	P	Coefficient	Ecart-type	P
Ordonnée à l'orig	219.4	9.25	0	287.47	18.03	0 *
PX ²	-3.2	1.41	0.02 *	1.40	2.3	0.54
PX	3	1.34	0.02 *	-0.21	2.19	0.92
Taille (Grands c.)	-8.98	7.22	0.21	-116.80	11.79	0 *
Fréquence (Haute)	-3.27	5.33	0.54	-20.85	8.7	0.02 *
Longueur (6 lettres)	10.75	7.4	0.15	-26.39	12.06	0.03 *
Taille (G) : PX ²	-2.38	0.87	0.01 *	6.76	1.42	0 *
Taille (G) : Fréquence (H)	-6.14	6.8	0.37	8.20	11.1	0.46
Taille (G) : Longueur (6L)	18.32	7.57	0.02 *	5.56	12.35	0.65
PX ² : Longueur (6)	0.21	1.27	0.87	0.19	2.07	0.93

Tableau 7.4 – Effets fixes prédits par le LMM effectué les durées de premières et deuxièmes fixation sur le mot. Les interactions sont représentées par deux points « : » et les effets significatifs marqué par un astérisque « * » et surlignés en jaune. Les valeurs des facteurs à l'ordonnée à l'origine sont : site de départ = 0, taille de caractères = « petite », fréquence = « basse » et longueur des mots = « 4 lettres ».

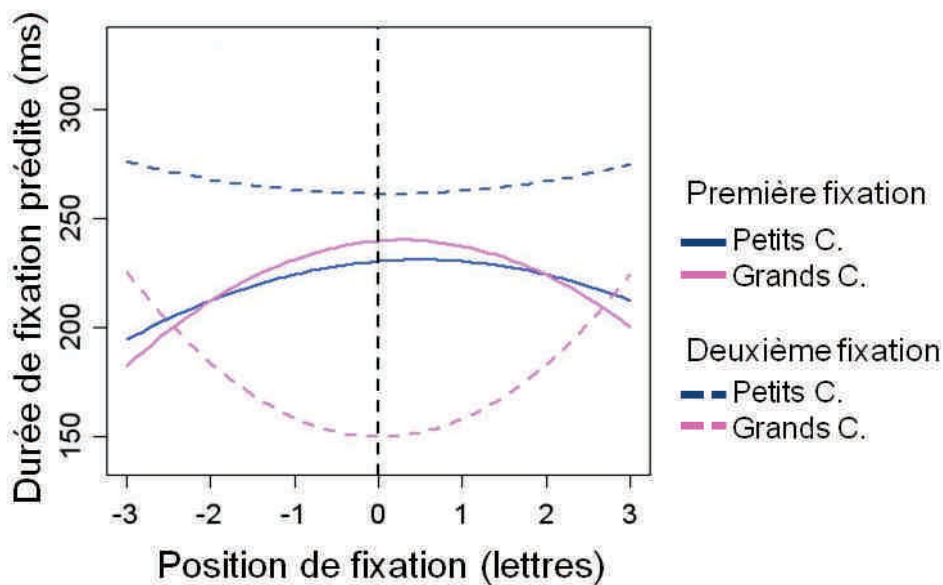


Figure 7.8 – Courbes prédites par le LMM effectué sur les durées de premières et deuxièmes fixation sur le mot, pour les mots de 6 lettres et de basse fréquence lorsqu'ils étaient fixés deux fois de suite, en fonction de la position de la première fixation sur le mot. Les courbes correspondant à la première fixation (lignes pleines) montrent un effet *I-OVP*. Celles correspondant à la deuxième fixation (en pointillés) montrent un effet inversé, c'est-à-dire, une augmentation des durées de fixation lorsque le regard s'éloigne du centre du mot, et ce, de manière plus importante pour les grands caractères.

Lorsque l'on regarde les prédictions du modèle dans le cas de la **deuxième fixation**, les effets sont radicalement inversés : les effets simples des facteurs catégoriels sont tous les trois importants et l'effet simple de la position de fixation à l'ordonnée à l'origine n'est plus significatif, que ce soit pour la composante linéaire ou quadratique. La durée de fixation prédite à l'ordonnée à l'origine est plus longue que pour la première fixation (287,47 ms). Elle est cette fois-ci plus longue pour les mots de basse que de haute fréquence (266,62 ms) et pour les mots de 4 lettres par rapport aux mots de 6 lettres (261,08 ms). Si les courbes correspondant à la petite taille de caractères n'ont pas une pente très marquée (effet de PX^2 non significatif), l'interaction positive entre la position de fixation et le facteur « taille » montre cependant un effet de la position du regard dans le cas des grands caractères ; dans ce cas les durées de fixation sont plus courtes lorsque le regard fixe le centre des mots (voir Figure 7.8, courbe mauve en pointillés).

Il apparaît donc que, dans les cas où les participants effectuent deux fixations sur le même mot, la durée de la première fixation est principalement influencée par la position du regard, et, cela de façon plus importante pour les grands caractères. Quant à la durée de la deuxième fixation, elle dépend, de manière importante, de la taille des caractères, de la fréquence et de la longueur des mots. Elle dépend aussi de la position de la première fixation dans le cas des grands caractères, montrant dans ce cas une courbe en "U", mais elle ne varie pas, en revanche, en fonction de la position de la deuxième fixation sur le mot (non présenté dans ce modèle). Notons aussi que le facteur « taille » peut interagir à la fois avec la position du regard et la longueur des mots, mais que ces deux facteurs n'interagissent pas entre eux. De plus, la fréquence des mots n'interagit, elle, avec aucun des autres facteurs étudiés, que ce soit dans cette analyse ou dans la précédente (les interactions entre la fréquence et tous les autres facteurs ont été testés de manière indépendante, non présenté ici).

7-4 – DISCUSSION

Notre étude avait pour objectif de mesurer, de manière précise, l'effet de la taille des caractères sur les mouvements oculaires et de préciser cet effet en nous appuyant sur des phénomènes robustes tels que l'effet *I-OVP*, l'effet *rOVP* et l'effet du site de départ. Nos résultats montrent bien que la taille des caractères peut influencer la durée des fixations et l'amplitude des saccades même lorsqu'elle est au dessus du CPS. Entre 0,2° et 0,4, l'amplitude des saccades est plus importante pour les petits que pour les grands caractères, et ce, en particulier lorsque le site de départ de la saccade est proche du mot cible. Les effets *I-OVP* et *rOVP*, ainsi que l'échange entre les durées de première et de seconde fixation sont, quant à eux, moins marqués, avec des pentes moins importantes, pour la petite taille de caractères. En plus de soulever l'importance de la taille des lettres sur les mouvements oculaires lors de la lecture, ces résultats apportent de nouveaux arguments en faveur d'une interprétation « bas niveau » de l'effet *I-OVP*, et contredisent l'interprétation classique de l'effet du site de départ sur l'amplitude des saccades, suggérant donc la nécessité de réviser les modèles actuels du guidage oculaire pendant la lecture.

7-4-1– Effets de la taille et empan visuel

Nos résultats montrent, tout d'abord un effet clair de la taille des caractères sur la durée des fixations, que ce soit sur les valeurs moyennes ou sur l'effet *I-OVP*. Nous avons obtenu un effet significatif de la taille des caractères sur la durée moyenne des fixations initiales sur le premier mot : lorsque la taille diminuait de 0,4° à 0,2°, la durée des fixations augmentait d'environ 10%, et ce, quelle que soit la fixation au sein du mot. Cet effet est surprenant car aucune étude précédente ne rapportait un tel effet dans une gamme de tailles de caractères supérieure au CPS. Néanmoins, il reste en adéquation avec les résultats obtenus par O'Regan et al. (1983) qui montraient une augmentation de près de 20% de la durée des fixations lorsque la taille des caractères passait de 0,24° à 0,12°. Même si, dans notre expérience, nous avons veillé à ce que la taille des caractères soit en théorie au dessus du CPS, il est possible, comme le soutiennent O'Regan et al. (1983), que cet effet soit dû à des difficultés de traitement. On peut envisager que dans la condition « petits caractères » (0,2°), les participants rencontraient malgré tout des difficultés à identifier les lettres, ce qui pourrait être responsable de l'augmentation de la durée des fixations. L'effet de la taille des caractères que nous avons obtenu sur la durée de la deuxième fixation peut aussi aller dans ce sens. Mais

nous avons aussi observé des amplitudes de saccades plus importantes dans le cas des petits caractères, ce qui suggère que la taille des lettres n'agit pas uniquement sur le traitement visuel en fovéa.

Une hypothèse en termes d'empan visuel peut alors être envisagée pour expliquer l'augmentation de la durée des fixations et de l'amplitude des saccades lorsque la taille des caractères diminue. Legge et al. ([1997b](#)) avaient, en effet, proposé que l'amplitude des saccades serait déterminée par la taille de l'empan visuel, et que les saccades seraient programmées de façon à compléter l'information visuelle manquante de façon optimale. Selon cette hypothèse, l'amplitude des saccades augmenterait en fonction de la taille de l'empan visuel. Même si leur modèle n'implémente pas l'aspect temporel du comportement oculomoteur, on peut penser que la durée des fixations pourrait aussi être déterminée par la taille de l'empan : plus l'empan visuel est étendu, plus il y a de lettres à identifier lors de la fixation et plus la fixation est longue. Une interprétation de nos données en termes d'empan visuel est cependant contredite par les résultats de Legge et al. ([2007](#)) qui montrent que l'empan visuel est maximal pour des tailles de caractères comprises entre $0,12^\circ$ et $0,5/1^\circ$, et par conséquent qu'il ne devrait pas varier pour la gamme de tailles utilisée dans notre expérience. De plus, les résultats obtenus chez des participants sains lisant avec un scotome artificiel, montrent, pour une taille de caractères égale au CPS, des durées de fixation plus longues en vision périphérique (6° ou 10°) qu'en vision centrale ([Scherlen et al., 2008](#)), alors que l'étude de Legge et al. ([2001](#)) rapporte un empan visuel près de 5 fois moins étendu à 10° qu'à 0° d'excentricité. De façon beaucoup plus importante, comme nous l'avons vu au Chapitre 2, une interprétation en termes d'empan visuel, de l'amplitude des saccades et des durées des fixations pendant la lecture de texte chez le sujet sain, a été envisagée par le passé ([McConkie, 1979](#)) et rejetée sur la base d'un certain nombre d'arguments (e.g. [O'Regan et al., 1983](#)). Par ailleurs, cette hypothèse, de la même façon que l'hypothèse à dominance cognitive, semble difficile à réconcilier avec le phénomène I-OVP pour les durées des fixations.

7-4-2– Effet de la taille sur les durées de fixation: un effet double, visuomoteur et cognitif

Comme nous venons de le voir, ni l'hypothèse cognitive, ni l'hypothèse d'empan visuel ne semblent pouvoir rendre compte de l'ensemble des effets observés de la taille des caractères. Notre analyse de l'effet de la taille des caractères sur les durées de première

fixation quel que soit le nombre de fixations sur le mot, ainsi que sur les durées de chacune des fixations dans le cas de deux fixations successives sur le mot suggère que la taille des lettres agirait, en réalité, à deux niveaux différents.

Le premier niveau, visuomoteur, en amont des processus associés à l'identification des mots est suggéré par les caractéristiques de la durée de première fixation. Cette durée, qui était assez courte (219 ms en moyenne lorsqu'elle est suivie d'une seconde et 296 ms quel que soit le nombre de fixations sur le mot) montrait, en effet, une interaction entre la position de fixation et la taille des lettres, ainsi que l'absence d'une interaction entre la taille des lettres et la fréquence des mots. Des processus visuomoteurs, jugeant de la qualité de la fixation/saccade à partir de l'emplacement estimé de la fixation dans le mot et décidant sur cette base le moment de déclenchement de la saccade, ont été proposés comme étant responsables de l'effet I-OVP (voir [Nuthmann et al., 2005](#); [Vitu et al., 2007](#)). Des processus visuomoteurs pourrait donc sous-tendre l'effet de la taille des lettres et la modification de l'effet I-OVP qu'elle entraîne (voir Section 7.4.3.). Les hypothèses proposées par Nuthmann et al. (2005) et Vitu et al. (2007) prédisent aussi que la longueur des mots devrait influencer la forme de l'effet I-OVP lors de la première fixation. Le fait que nous ayons observé une telle interaction pour la durée de première fixation quel que soit le nombre de fixations semble conforter notre interprétation, bien que l'absence d'une telle interaction dans les cas de deux fixations suggère que la longueur intervienne légèrement plus tardivement. Il est aussi possible que cette dernière absence d'interaction soit due au fait que la différence entre les mots courts et longs n'était pas très importante. Par ailleurs, l'observation selon laquelle la fréquence et la longueur des mots n'avaient pas d'effet sur la durée de la première fixation suggère que le traitement lexical et une grande partie du traitement visuel s'effectueraient plus tardivement, lors de la deuxième fixation.

La durée de la deuxième fixation, lorsque le mot était lu à l'aide de deux fixations consécutives, était plus longue (287 ms en moyenne) et dépendait, quant à elle, de la fréquence et de la longueur des mots. C'est cette durée qui suggère le second niveau, plus tardif, d'intervention de la taille des caractères. Nous avons vu que la taille influençait aussi très largement la durée de la deuxième fixation, et qu'elle montrait une interaction avec la position de la fixation initiale sur le mot. Lorsque la taille des caractères était petite, le temps passé à la seconde fixation ne variait pas avec la position initiale du regard, mais lorsque la taille des caractères était grande, il était plus court suivant une fixation initiale proche du centre du mot. Etant donnée que la durée de la première fixation montrait la relation inverse

en fonction de la position initiale de fixation (effet I-OVP), il semble raisonnable de supposer que la durée de la deuxième fixation reflétait le temps nécessaire pour compléter le traitement du mot et n'était donc qu'une conséquence de l'effet I-OVP apparaissant lors de la première fixation (voir [O'Regan & Lévy-Schoen, 1987](#)). Lorsque la fixation initiale était centrale, le traitement d'un mot écrit en grands caractères était beaucoup plus avancé et le temps nécessaire pour compléter ce traitement beaucoup plus court que lorsque la fixation initiale se situait au début ou à la fin des mots. Néanmoins, lorsque le mot était écrit en petits caractères, le traitement effectué initialement était probablement insuffisant, quel que soit l'emplacement initial du regard, probablement du fait d'une plus grande difficulté à extraire les lettres du mot, et la durée de la seconde fixation grandement prolongée. Ainsi, la taille des caractères semblait, en plus de son effet visuomoteur, précoce, affecter la qualité de traitement du mot, et cet effet se répercutait tardivement, sur les durées de deuxième fixation.

Enfin, comme nous l'avons vu en introduction, quelle que soit l'interprétation de l'effet I-OVP, l'effet rOVP serait en quelque sorte la conséquence de l'effet I-OVP. Selon Nuthmann et al. ([2005](#)), la détection d'une erreur de visée pourrait être suivie d'une saccade corrective, selon l'état d'avancement du traitement sur le mot au moment où la saccade est programmée. Selon Vitu et al. ([2007](#)), le départ plus prématuré du regard lorsqu'il est proche du début ou de la fin des mots, favoriserait l'exécution de saccades de petite amplitude, mais aussi de refixations liées au traitement peu avancé du mot. Le fait que l'effet rOVP dans notre expérience variait avec la taille de caractères, suggère d'après notre interprétation d'un effet double de la taille des caractères, que selon le moment où la refixation était initiée, elle était soit l'effet de processus visuomoteurs, soit le résultat de l'avancement du traitement du mot.

Par conséquent, même si nous n'excluons pas la possibilité d'un rôle de la taille des caractères au niveau du traitement visuel et/ou de la visibilité des lettres, la taille des caractères semble jouer prioritairement sur des mécanismes de « bas niveau », liés au contrôle visuomoteur. Nos arguments sont développés dans les deux sections suivantes.

7-4-3 – Effet I-OVP : un argument en faveur d'une hypothèse visuomotrice

Comme nous venons de le discuter, les résultats mis en évidence sur les variations de la durée des fixations en fonction de la position de fixation dans le mot montrent un effet précoce de la taille des caractères sur la forme des courbes. Les courbes *I-OVP* sont plus hautes et plus aplaties pour les petits que pour les grands caractères, ce qui signifie que les

durées de fixation sont augmentées lorsque la taille des caractères diminue, et ce, de façon plus importante lorsque le regard fixe les extrémités du mot. Nous avons, en accord avec les deux principales explications à dominante visuomotrice des effets *I-OVP* et *rOVP* (Nuthmann et al., 2005; Vitu et al., 2007), attribué ces variations de l'effet I-OVP à des processus visuomoteurs, en amont du traitement lexical du mot.. Nous allons détailler ici la nature de ces processus.

Selon les deux interprétations visuomotrices de l'effet I-OVP, le système se baserait sur des indices visuels « grossiers » pour juger de la qualité de la fixation, à savoir respectivement si elle correspond à une erreur de visée (Nuthmann et al., 2005) ou bien une position non-optimale pour le traitement (Vitu et al., 2007); il déciderait sur cette base du moment de départ de la saccade. Même si aucune de ces deux hypothèses n'implémente l'effet de la taille des lettres, nous pouvons envisager plusieurs mécanismes visuomoteurs capables d'expliquer l'affaiblissement de l'effet I-OVP lorsque la taille des caractères diminue. Il est tout d'abord possible que, lorsque la taille des caractères diminue, et que, par conséquent, l'espacement entre les mots diminue aussi, l'effet de l'encombrement rende plus difficile l'estimation de l'emplacement de la fixation par rapport aux bords du mot. Cela réduirait la probabilité qu'une fixation centrale soit prolongée par rapport à une fixation non-optimale dans le cadre de l'hypothèse proposée par Vitu et al. (2007). Cela réduirait la détection d'une erreur de visée (fixation proche des bords du mot) dans le cadre de l'hypothèse de Nuthmann et al. (2005). Il est aussi possible que la diminution de la distance entre les lettres, donc dans la condition "petits caractères", fasse qu'une position de fixation centrale ne soit pas beaucoup plus avantageuse qu'une position de fixation excentrée pour la reconnaissance de mots. Selon l'hypothèse d'économie perceptive, cela pourrait entraîner l'adoption d'une stratégie plus souple lorsque la taille des lettres diminue. Le système favoriserait moins le centre des mots et ne prolongerait pas beaucoup plus les fixations à cette position par rapport aux autres. On pourrait aussi supposer que, pour déterminer si le regard doit ou non rester à une position donnée, le système évalue à la fois la probabilité de reconnaître le mot en restant à cette position et le coût d'une éventuelle refixation (en termes de temps de programmation et d'exécution d'une autre saccade). Lorsque la taille des lettres est réduite, il serait plus long et plus coûteux de reprogrammer une saccade vers le centre du mot car elle nécessiterait plus de précision que lorsque les caractères sont plus grands (pour une revue voir Vitu, 2008). Le système favoriserait donc la solution alternative, à savoir rester à la même position et éventuellement prolonger la durée de la fixation, le plus souvent quel

que soit son emplacement. Ceci expliquerait pourquoi l'effet I-OVP, et par conséquent l'effet rOVP étaient moins marqués pour les petits que pour les grands caractères. Ces deux dernières interprétations en termes de stratégies d'économie perceptive et motrice ne pourraient cependant se mettre en place qu'à condition que la taille des caractères soit prédictible au sein d'un bloc d'essais comme cela était le cas dans la présente expérience. En effet, les stratégies supposées contrôler le départ du regard ne sont pas le résultat du traitement « online » du mot, mais sont des stratégies offlines, adaptives. Pour confirmer ces hypothèses, il serait donc nécessaire de vérifier que le phénomène I-OVP ne varie pas en fonction de la taille des caractères lorsque celle-ci n'est pas prédictible au sein d'un bloc d'essais.

7-4-4 – Taille des lettres et effet du site de départ

En plus de l'effet de la taille des caractères sur les durées des fixations, nous avons observé un effet au niveau de l'amplitude des saccades, qui se caractérisait par un effet du site de départ plus marqué, avec une pente plus importante, dans le cas des petits caractères. L'effet du site de départ montre que la tendance générale à fixer vers le centre des mots provient de la sommation de plusieurs distributions composites, dépendantes de la distance entre le point de départ de la saccade et le début du mot. Plus le site de départ de la saccade est éloigné, plus la saccade va avoir tendance à « sous-viser » le centre du mot et plus la distribution des points d'atterrissage va se décaler vers le début du mot. A l'inverse, plus le site de départ se rapproche du mot, plus la distribution va se décaler vers la fin du mot. Lorsque l'on représente la relation entre la position du site de départ, exprimée par rapport au centre des mots, et la position d'atterrissage moyenne des saccades, on obtient donc une droite dont la pente est en moyenne de 0,5 lettre et qui varie peu en fonction de la longueur des mots ([McConkie et al., 1988](#), pour une revue voir [Vitu et al., 2007](#)). Deux hypothèses principales ont été avancées pour expliquer l'effet du site de départ ([McConkie et al., 1988](#); [Vitu, 2008](#)). Celle proposée par McConkie et al. ([1988](#)), et reprise dans la plupart des modèles actuels du contrôle oculomoteur pendant la lecture (voir Chapitre 2), part du principe que le regard vise le centre de mots sélectionnés comme cible en vision périphérique et que la dispersion des points d'atterrissage des saccades est le reflet d'erreurs oculomotrices systématiques, appelées « erreurs de gamme ». Il y aurait un biais de l'amplitude des saccades vers une saccade d'amplitude moyenne, dont la valeur dépendrait de la gamme des amplitudes des saccades

effectuées durant la tâche. La seconde, avancée par Vitu (2008), est une hypothèse à dominante visuomotrice ; elle suggère que l'effet du site de départ serait dû à un effet global (voir aussi Vitu & Blanes, 2009). Les saccades seraient attirées vers une position correspondant au centre de gravité de la configuration visuelle périphérique, indépendamment des frontières entre les mots.

Ces deux hypothèses prédisent des effets différents d'une modification de la taille des caractères. L'interprétation en termes d'erreurs de gamme ne prédit, selon nous, aucun changement de l'effet du site de départ lorsque la taille des lettres varie, à condition que ce facteur soit « bloqué » dans l'expérience. En effet, les auteurs expliquent que l'amplitude de la saccade moyenne vers laquelle le système est biaisé dépend de l'ensemble des saccades effectuées durant la tâche. Ici, nous avons fait passer aux participants cinq blocs d'essais dans une taille de caractères puis cinq blocs dans l'autre. Puisque l'erreur de visée est proportionnelle à l'étendue de la gamme, les courbes devraient avoir la même pente et la même abscisse à l'origine dans les deux conditions de taille, lorsqu'on les représente en nombre de lettres). Or, ce n'est pas ce que nous avons observé ici. L'analyse des positions d'atterrissage de toutes les saccades initiales a montré que les saccades avaient tendance à atterrir plus loin dans la condition « petits caractères » que dans la condition « grands caractères » et que cet effet, très léger pour les sites de départ éloignés, augmentait lorsque le site de départ se rapprochait du début du premier mot. De plus, l'abscisse à l'origine des droites, indiquant, théoriquement, l'amplitude des saccades moyennes, était légèrement plus importante pour les petits (7,5 lettres) que pour les grands caractères (7 lettres). Enfin, les mots assignés à chacune des tailles de caractères étaient les mêmes au travers des participants, il est donc aussi très peu probable que les conditions interféraient entre elles puisque les gammes d'excentricités étaient bien séparées.

Nos résultats, semblant aller à l'encontre d'une hypothèse en termes d'erreurs de gamme, peuvent en revanche être expliqués en termes d'effet global. En effet, Vitu (2008) avait proposé que les variations de la position d'atterrissage des saccades soient le reflet d'un effet global apparaissant lors de la lecture de texte. Les saccades ne seraient pas dirigées vers une cible particulière mais vers une position correspondant au centre de gravité d'un sous ensemble des lettres situées à droite du point de fixation. Le calcul de la position de ce centre de gravité se ferait sur une zone limitée de taille angulaire constante (Vitu & Blanes, 2009 ; en préparation). Etant donné, comme nous l'avons illustré plus haut (voir Figure 7.1), que le nombre de lettres contenues dans la zone d'intégration, et situées à droite du mot test, est plus

important lorsque les caractères sont plus petits, le centre de gravité est tiré plus en avant et la saccade termine sa course plus près de la fin de mots écrits en petits qu'en grands caractères. De plus, les lettres additionnelles étant plus nombreuses et moins excentrées dans la condition petits caractères, leur « poids » et par conséquent la déviation de l'œil est d'autant plus importante pour des sites de départ proches. Comme nous l'avons noté plus haut, d'autres indices visuels de bas niveau comme l'emplacement des espaces inter-caractères et par conséquent la longueur des mots contribuent à pondérer le centre de gravité, et il est possible que ceux-ci soient responsables en partie des résultats observés. Seule l'implémentation de la théorie proposée par Vitu permettra de tester la mesure dans laquelle elle permet de prédire nos résultats. Néanmoins, elle est à l'heure actuelle la seule hypothèse, plausible pour rendre compte à la fois de l'effet du site de départ classiquement observé pendant la lecture de textes et l'effet de la taille des caractères mis en évidence dans cette étude.

7-5 - CONCLUSION

En résumé, il semblerait que la taille des caractères agisse sur la durée des fixations et l'amplitude des saccades, même lorsqu'elle est supérieure au CPS. La taille des caractères influencerait les durées des fixations à deux niveaux, correspondant à des étapes assez précoces du traitement visuel : une première étape, traitant les indices visuels « grossiers », qui permettrait d'évaluer la position de la fixation et de déterminer si le regard doit bouger ou prolonger la fixation, et un niveau plus tardif, lié à l'identification des lettres. La taille des caractères influencerait aussi l'amplitude des saccades, vraisemblablement en contribuant au calcul du centre de gravité de la configuration visuelle périphérique, suggérant donc qu'elle interviendrait à un niveau de traitement des plus précoces, indépendant du traitement en temps réel des lettres et mots en vision périphérique.

En plus d'apporter des arguments théoriques supplémentaires soutenant plutôt les interprétations visuomotrices du comportement oculaire, nos résultats permettent d'expliquer pourquoi les études précédentes n'avaient montré une augmentation de la durée des fixations que lorsque la taille des caractères devenait inférieure au CPS. Elle suppose que les effets apparaissant sur les mouvements oculaires dans des gammes de taille supérieures au CPS ne seraient visibles qu'à l'échelle « locale », lorsque l'on analyse la durée des fixations en fonction de la position initiale du regard. Etant donné la préférence à fixer le centre des mots lors de la lecture de texte et l'effet plus réduit de la taille des caractères pour des positions de

fixation centrales, analyser globalement les durées de fixation noie probablement les effets de la taille des caractères et laisse penser que celle-ci n'est pas un facteur critique pour la détermination des durées de fixations. Quant au rôle de la taille des caractères sur l'amplitude des saccades, il ne serait visible que lorsque le site de départ des saccades est pris en compte. Il semble que le domaine de la lecture en vision centrale bénéficierait d'une étude plus approfondie du rôle joué par la taille des caractères, que ce soit sur la visibilité des lettres ou sur le comportement oculomoteur. La question reste néanmoins posée de savoir si la taille des caractères, lorsqu'elle est au-dessus du CPS, joue aussi un rôle important sur la lecture en vision périphérique. Cette question fera l'objet de futures recherches.

DISCUSSION GENERALE

La lecture est une activité complexe qui nécessite, entre autres, la mise en jeu coordonnée des systèmes visuel et oculomoteur dans le but d'extraire et de transmettre l'information visuelle. Afin de déterminer les mécanismes sous-tendant cette activité, il est donc indispensable de savoir quels sont les facteurs visuels qui influencent d'une part l'identification des lettres et des mots et d'autre part, le contrôle des déplacements des yeux. Il est aussi important de déterminer la façon dont la qualité du contrôle oculomoteur peut influencer le traitement des informations visuelles. Notre objectif était de proposer une approche globale de l'étude des facteurs visuels et oculomoteurs mis en jeu lors de la lecture en vision normale, et aussi en vision périphérique, c'est-à-dire lorsque la partie centrale du champ visuel est masquée, comme c'est le cas pour les patients porteurs d'un scotome maculaire.

8-1 – ROLE DES FACTEURS VISUELS DANS LECTURE

8-1-1 – Cadre théorique et questions posées

Les mots constituent des objets visuels particuliers, ce sont des assemblages de lettres qui, une fois perçus, doivent être décodés et interprétés. La reconnaissance d'un mot dépend donc de la visibilité des lettres le constituant mais aussi de ses propriétés lexicales et sémantiques. Les études menées sur les performances d'identification de mots isolés, présentés en vision centrale, ont permis de mettre en évidence les effets robustes de facteurs de haut niveau tels que la fréquence lexicale ou le voisinage orthographique sur la probabilité d'identification ([Andrews, 1989](#); [Grainger, 1990](#); [New et al., 2001](#)). Ces observations ont servi de base à l'élaboration de plusieurs modèles de la psycholinguistique qui parviennent à prédire les performances de reconnaissance de mots à partir uniquement de leur propriétés orthographiques et lexicales (pour une revue voir [Ferrand, 2007](#)). Mais, plusieurs expériences testant l'effet des paramètres de présentation visuelle sur les performances de reconnaissance de mots ont montré que l'identification des mots était aussi influencée par des facteurs visuels, et notamment que la quantité d'information visuelle qui avait été extraite jouait un rôle fondamental. Dans le cadre de notre travail, nous avons choisi de nous intéresser au

phénomène OVP, un effet robuste et largement étudié en vision centrale, qui montre que les performances de reconnaissances sont fortement contraintes par la position initiale de fixation au sein des mots ([Nazir et al., 1991](#); [Brybaert et al., 1996](#)). La probabilité de reconnaître un mot est maximale lorsque la fixation est proche du centre du mot puis diminue au fur et à mesure que le regard s'éloigne de cette position de fixation optimale. Deux théories principales ont été avancées pour expliquer cet effet en vision centrale. La première, repose sur les résultats montrant que la forme de l'effet OVP pouvait être modifiée selon la répartition de l'information lexicale dans le mot ([Brybaert et al., 1996](#); [Farid & Grainger, 1996](#)). Ceci a amené des auteurs, comme notamment Clark et O'Regan ([1999](#)) à proposer un modèle basé exclusivement sur les contraintes lexicales pour rendre compte de la diminution des performances de reconnaissance de mots en fonction de la position horizontale de fixation (voir aussi [Stevens & Grainger, 2003](#)). Parallèlement, une deuxième hypothèse explicative a été proposée. Celle-ci suggère, au contraire, que les variations de la probabilité de reconnaissance avec l'emplacement de la fixation initiale dépendent uniquement des contraintes visuelles ; les performances diminuent lorsque le regard fixe les extrémités du mot plutôt que sa partie centrale parce qu'une quantité moins importante de lettres a pu être extraite lors de la fixation ([McConkie et al., 1989](#); [Nazir et al., 1991](#)). Cette hypothèse s'appuie sur les simulations d'un modèle implémentant différentes variantes de cette hypothèse. Elle est aussi confirmée par plusieurs résultats empiriques montrant notamment l'influence d'un changement progressif de l'éloignement ou de la taille des lettres sur la forme des courbes OVP ([Nazir et al., 1992](#); [Nazir et al., 1998](#)). Ces résultats suggèrent que les performances de mots sont limitées par deux facteurs visuels principaux : l'acuité visuelle et l'encombrement, qui font que les performances visuelles diminuent lorsque l'excentricité de fixation augmente (voir [Brybaert & Nazir, 2005](#)).

Un troisième paramètre visuel entre en jeu dans la reconnaissance de mots, il s'agit du temps de présentation. Il a été montré, pour des lettres présentées dans des triplets, que le seuil temporel de détection d'un mot augmentait et que la probabilité de reconnaissance d'un mot présenté pour une durée brève diminuait lorsque l'excentricité de fixation augmentait, et ce, même lorsque la taille des lettres était magnifiée ([Legge et al., 2001](#)). La notion d'empan visuel, développée par O'Regan et al. ([1983](#)), peut servir d'indicateur de la visibilité des lettres. L'empan visuel est défini comme la zone, mesurée en nombre de caractères, au sein de laquelle il est possible d'identifier une lettre, sans faire de saccades et sans l'aide du contexte lexical ou sémantique. Il a été mesuré comme étant de 11 lettres en vision centrale pour un

temps de présentation de 150 ms et un seuil correspondant à un pourcentage de réussite de 50% ([O'Regan et al., 1983](#)), et selon l'étude paramétrique de [Legge et al., 2001](#)). Sa taille diminue lorsque l'excentricité verticale augmente ou lorsque le temps de présentation diminue. L'empan visuel permet donc de rendre compte des effets combinés de l'acuité visuelle et de l'encombrement, ainsi que du temps de traitement du signal sur la visibilité des lettres. Les études portant sur la reconnaissance de mots en vision périphérique ont, entre autres, montré que la vitesse de lecture en RSVP était fortement corrélée à la taille de cet empan, ce qui a amené Legge et ses collaborateurs à proposer que la taille de l'empan serait le principal facteur visuel responsable de la diminution de la vitesse de lecture en vision excentrée (Legge et al. [1997a](#); [2007](#) ; mais voir [Pelli et al., 2007](#)). Mais la mesure même de l'empan visuel peut soulever certaines questions. Il a été montré que la taille de l'empan visuel et les caractéristiques des mouvements oculaires étaient relativement invariantes lorsque la taille des lettres est comprise entre $0,12^\circ$ et 1° ([Rayner, 1998](#); [Legge et al., 2007](#)), c'est-à-dire dans une zone proche ou supérieure au CPS (environ $0,2^\circ$ en vision centrale chez [Chung et al., 1998](#)). Pour cette raison, dans les expériences réalisées en vision périphérique, la taille des caractères est toujours ajustée proportionnellement au seuil d'acuité ou au CPS (généralement 1,5 à 2 fois plus grande) afin de s'assurer qu'elle ne soit pas un facteur limitant pour l'identification des lettres (mais voir [Battista & Kalloniatis, 2002](#)). Mais rien ne garantit que la taille de l'empan visuel et les performances de reconnaissance de mots en vision périphérique ne soient pas influencées par ce choix méthodologique. Il a par ailleurs été montré, qu'en vision centrale, la taille de l'empan visuel diminuait pour des tailles de caractères inférieures à $0,2^\circ$ et supérieures à 1° et que la durée moyenne des fixations augmentait pour des tailles inférieures à $0,24^\circ$ ([O'Regan et al., 1983](#); [Legge et al., 2007](#)). Il était donc, selon nous, possible que des variations de l'empan visuel et des mouvements oculaires soient aussi présentes entre ces deux valeurs mais qu'elles n'aient jamais été clairement mises en évidence, du fait, notamment des paradigmes adoptés et de l'utilisation d'indices très globaux pour mesurer les effets de la taille des caractères.

Dans cette partie de notre travail, nous nous sommes posé deux questions principales. La première reposait sur le fait que les effets de la position horizontale de fixation sur les performances de reconnaissance de mots, bien connus en vision centrale n'avait, en revanche, pas été très étudiés en vision périphérique. A l'exception d'une étude menée par Battista et Kalloniatis ([2002](#)), il n'y avait, à notre connaissance, aucune donnée empirique sur le devenir

du phénomène OVP lorsque le mot est décalé verticalement par rapport au point de fixation. Nous nous sommes donc, dans un premier temps, interrogés sur l'influence de la position verticale de fixation sur la reconnaissance des mots et plus particulièrement sur le phénomène OVP. Cette question était, à notre avis, cruciale, d'une part, pour la compréhension des mécanismes généraux de la lecture, car elle devait permettre d'apporter des informations supplémentaires concernant la contribution des facteurs visuels limitant la reconnaissance de mots. D'autre part, elle était fondamentale pour la lecture en vision périphérique, car elle devait permettre de prédire l'influence de la position horizontale de fixation chez les lecteurs porteurs d'un scotome maculaire, naturel ou artificiel.

Une deuxième question à laquelle nous nous sommes intéressés était relative au choix classique de compenser l'excentricité verticale par une augmentation de la taille des lettres. Nous nous sommes demandé si la taille des lettres pouvait avoir un effet sur la taille de l'empan visuel ainsi que sur le comportement oculomoteur. Si la taille des lettres jouait effectivement un effet, ceci pourrait remettre en question la mesure même de l'empan visuel en vision périphérique, puisqu'elle est effectuée pour des tailles de caractères différentes selon l'expérience, et même selon les participants au sein d'une même expérience.

8-1-2 – Résultats et discussion

Une partie des résultats obtenus converge tout d'abord vers la preuve d'un rôle prépondérant des facteurs visuels dans la reconnaissance de mots, que ce soit en vision centrale ou en vision périphérique. Nous avons conclu des expériences réalisées, que les performances de reconnaissance, la vitesse de lecture et les mouvements oculaires pouvaient varier de façon importante selon les conditions de présentation, c'est-à-dire la distance verticale de fixation, la taille des lettres et le temps de présentation.

L'effet de la **distance verticale de fixation** a été mis plus particulièrement en évidence dans la première expérience (Chapitre 5). Cette étude avait pour objectif principal d'étudier les caractéristiques du phénomène OVP en vision centrale et en vision périphérique, lorsque le mot était présenté à une excentricité de 3° en-dessous du point de fixation. Nos résultats ont montré que l'effet OVP était présent en vision périphérique, mais qu'il était cependant réduit par rapport à l'effet observé en vision centrale. Comme l'ont révélé les différentes analyses que nous avons conduites, ce résultat ne pouvait être dû au fait que la condition de présentation en vision périphérique était systématiquement passée en dernier, ou

bien encore provenir de l'utilisation de deux listes de mots différentes pour les deux conditions. Etant donné que ni le numéro du bloc d'essais, ni la catégorie de fréquence des mots n'affectaient la pente des courbes OVP, l'affaiblissement de l'effet OVP dans le champ visuel inférieur ne pouvait être attribué à l'apprentissage ou à des contraintes lexicales. Nous avons conclu que l'aplatissement des courbes OVP en vision périphérique était probablement l'effet de facteurs visuels, et plus particulièrement ici, l'acuité visuelle et l'encombrement. Ces données soutiennent l'hypothèse « visuelle » proposée par McConkie et al. (1989) et Nazir et al. (1991), selon laquelle l'effet OVP serait principalement dû à une diminution de la visibilité des lettres en fonction du décalage horizontal. Cette diminution étant moins rapide en vision périphérique, probablement du fait des propriétés géométriques de l'acuité visuelle et de l'encombrement (voir Figure 8.1.), il est cohérent que nous ayons obtenu des courbes plus aplaties lorsque les mots étaient présentés dans le champ visuel inférieur.

Comme nous l'avons déjà précisé, cet effet ne peut être obtenu qu'à condition que la **taille des caractères** soit la même quelle que soit la distance verticale de fixation et que le temps de présentation ne soit pas un facteur limitant. En effet, si nous avons choisi de compenser l'excentricité verticale par une augmentation de la taille des lettres, ce qui se fait souvent dans les études sur les performances de lecture en vision périphérique, nous n'aurions sûrement pas obtenu cet affaiblissement de l'effet OVP dans la condition « décalée verticalement ». Comme il l'est illustré à la Figure 8.1, si l'on choisit, par exemple, une taille de lettres deux fois plus importante en vision périphérique (courbe noire en pointillés) qu'en vision centrale (courbe noire, trait plein), les courbes représentant l'augmentation de la distance 2D des lettres en fonction de leur décalage horizontal ont une pente à peu près identique. Au contraire, si la taille des lettres n'est pas compensée (courbe grise en pointillés), l'augmentation de la distance 2D est beaucoup moins rapide que dans les deux autres conditions. Ceci prédit donc une diminution moins rapide de l'acuité visuelle et une augmentation moins rapide de l'encombrement en fonction du décalage horizontal du mot dans le cas où la taille des lettres n'est pas compensée. Ces deux facteurs agissant sur la visibilité des lettres, il est possible que l'aplatissement des courbes OVP soit le reflet d'une légère augmentation de la taille de l'empan visuel lorsque l'excentricité verticale augmente mais que la taille des lettres reste la même.

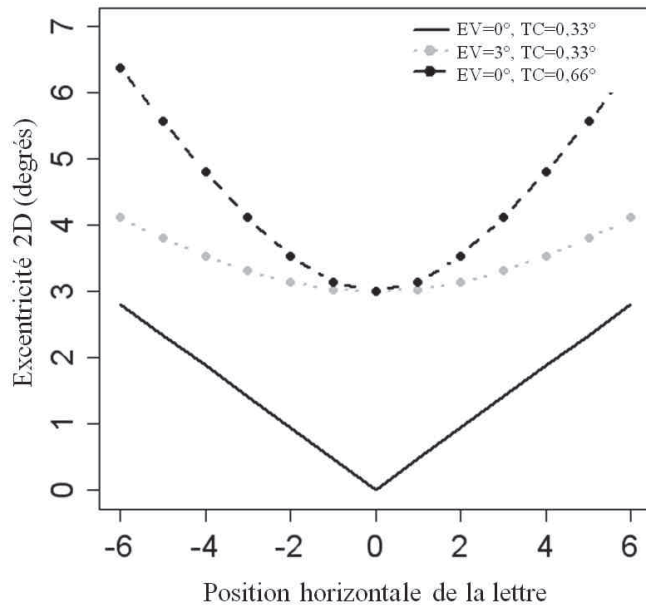


Figure 8.1 – Variations de l'excentricité 2D des lettres en fonction de leur décalage horizontal par rapport au point de fixation, pour des lettres de $0,33^\circ$ présentées en vision centrale (courbe noire, trait plein) et à une excentricité de 3° en dessous du point de fixation (courbe grise, pointillés), ainsi que pour des lettres de $0,66^\circ$ présentées à une excentricité verticale de 3° (courbe noire, pointillés).

Notre troisième expérience (Chapitre 7) n'avait pas pour objectif principal d'étudier l'influence des facteurs visuels sur les performances de lecture, mais les résultats obtenus montraient une augmentation de l'amplitude des saccades et de la durée des fixations lorsque la taille des lettres diminuait de $0,4^\circ$ à $0,2^\circ$. Selon l'hypothèse considérée, ceci pourrait être soit le reflet d'une diminution de la visibilité des lettres (voir [Rayner, 1998](#)), soit, au contraire, le reflet d'une augmentation de l'empan visuel : il y a plus de lettres visibles en une fixation, c'est pourquoi le temps de fixation est plus important et les saccades plus grandes ([Legge et al., 1997b](#)). Comme nous allons le détailler plus loin ([8-2-2-1](#)), une autre possibilité serait qu'un effet précoce de la taille des caractères sur les mouvements oculaires mesurés à l'échelle du mot soit principalement dû à des facteurs de plus bas niveau, d'ordre visuomoteur, et que seul le deuxième effet, plus tardif. Pour preuve, nous avons montré que la durée de la deuxième fixation était plus longue, et l'effet OVP pour la durée était moins marqué pour les petits que pour les grands caractères. Ainsi, la taille des caractères, même lorsqu'elle est a priori au dessus du CPS, influence les mouvements oculaires et probablement aussi la taille de l'empan visuel.

L'effet du **temps de présentation** n'a pas été testé directement dans notre expérience sur le phénomène OVP (Chapitre 5) car nous nous sommes concentrés sur l'éventuel effet de la taille des caractères et avons donc choisi de compenser l'excentricité verticale par l'augmentation du temps de présentation. Mais les résultats obtenus en vision centrale par

Brysbaert et al. (1996) montrent qu'à partir du moment où l'on évite les effets de plafond ou de plancher, la forme de l'OVP n'est pas modifiée par le temps de présentation. Il est donc probable que ce soit aussi le cas en vision périphérique et que l'affaiblissement de l'effet OVP que nous avons observé en vision périphérique ne soit pas dû au fait que les temps de présentation étaient différents d'une condition d'excentricité à l'autre.

Il semblerait donc que, même si l'acuité visuelle, l'encombrement et le temps de présentation des lettres varient de façon linéaire en fonction de l'excentricité rétinienne, la taille de l'empan visuel ne suive pas forcément les règles de linéarité applicables aux autres stimuli visuels (Wilson et al., 1990), car elle dépend aussi de la taille des lettres. Ceci est dû au fait que, contrairement aux lettres isolées, les mots (ou les chaînes de lettres) sont des stimuli s'étendant sur une zone horizontale relativement importante. Par conséquent, les effets de l'acuité visuelle et de l'encombrement sur les lettres situées aux bords des mots varient selon la distance verticale de fixation. Si l'on augmente la taille des caractères en vision périphérique, on réduit certes la difficulté de traitement des lettres prises une à une, mais cela entraîne aussi une diminution de l'acuité visuelle et une augmentation de l'encombrement pour les lettres situées sur les bords du mot. La taille de l'empan visuel et ses variations en fonction de l'excentricité verticale sont donc totalement dépendantes de la taille des caractères. Ce constat peut pointer certains problèmes méthodologiques liés à la mesure de l'empan visuel. En effet, même dans les études paramétriques les plus complètes, l'effet de la taille des lettres n'est pas mesuré de façon précise (Legge et al., 2001; Chung et al., 2004; Cheong et al., 2008) et la taille des lettres utilisée varie même d'un participant à l'autre selon la valeur estimée de son CPS. Legge et al. (2001) ont montré que la taille de l'empan visuel diminuait rapidement lorsque l'excentricité verticale de présentation augmentait, mais ce résultat pourrait être dû, du moins en partie, au fait que la taille des lettres était magnifiée en fonction du décalage vertical des lettres. Le même problème peut se poser dans les études portant sur le comportement oculaire des patients DMLA ou des participants sains lisant en vision périphérique, où, là aussi, la taille des lettres n'est parfois pas contrôlée. Il est, enfin, possible que les variations rapportées dans ces études, des mouvements oculaires, comme notamment la diminution de la durée des fixations ou de l'amplitude des saccades, soient en partie dues au fait que la taille des caractères est fortement augmentée en fonction de l'excentricité de lecture.

8-2 – ETUDE DES ASPECTS OCULOMOTEURS DE LA LECTURE

Parallèlement à l'étude des performances d'identification, nous nous sommes intéressés aux variations des performances oculomotrices durant la lecture, en vision centrale et en vision périphérique. En vision centrale, l'étude des propriétés visuelles et lexicales du texte, mais aussi des régularités du système oculomoteur, visent surtout à mieux comprendre les facteurs déterminant les mouvements oculaires au sein des mots dans le but d'élaborer des modèles explicatifs de la lecture. En vision périphérique, en revanche, les expériences mesurant les mouvements des yeux ont plutôt pour objectif de déterminer les contraintes visuelles et oculomotrices limitant la vitesse de lecture afin d'améliorer les performances des patients atteints de dégénérescence maculaire (DMLA ou maladie de Stargardt).

8-2-1 - Comportement oculomoteur en vision centrale et taille des lettres

8-2-1-1 – Cadre théorique et questions posées

Dès les premières études des mouvements oculaires durant la lecture, il a été observé que le regard se déplaçait le long des lignes de texte, en suivant certaines régularités ([Lamarre, 1892](#)). Chez un lecteur normal, les saccades sont principalement progressives (i.e., environ 90%), et leur amplitude, définie en nombres de lettres, est en moyenne de 6 à 9 caractères; elles sont séparées par des fixations dont la durée est d'environ 250 ms ([Morrison & Rayner, 1981](#); [O'Regan, 1990](#)) pour une revue voir [Vitu, 2007](#)). Mais il a aussi été montré que ce comportement oculomoteur relativement régulier pouvait être influencé par les caractéristiques visuelles et linguistiques du texte lu, comme notamment la longueur, la fréquence ou la prédictibilité des mots (pour une revue voir [Rayner, 1998](#)). De plus, des analyses plus « locales », réalisées à l'échelle du mot, ont permis de mettre en évidence des effets robustes des facteurs visuels et lexicaux sur le comportement oculomoteur intra- et inter-mots. Ces résultats ont mené à l'élaboration de modèles et théories du guidage oculomoteur qui, selon leurs hypothèses fondamentales, proposent une interprétation à dominante cognitive ou au contraire plutôt visuomotrice des mécanismes mis en jeu durant la lecture (voir [Ferrand, 2007](#)).

Dans le cadre de notre étude des mouvements oculaires durant la lecture en vision centrale, nous nous sommes attachés à préciser le rôle des facteurs visuels et plus spécifiquement l'influence de la taille des lettres sur le comportement oculomoteur. Comme

nous l'avons vu dans la première partie, cette question méritait d'être réexaminée pour une meilleure compréhension des processus associés au traitement visuel des mots, mais comme nous allons le rappeler ici, elle présentait aussi un intérêt pour une meilleure compréhension des mécanismes guidant le regard le long des lignes de texte. Etant donné que la taille des lettres, tout comme la plupart des facteurs visuels, a deux possibles influences, l'une bas niveau, visuomotrice et associée à la programmation des saccades, et l'autre plus haut niveau, associée au traitement visuel des lettres et des mots, nous avons pris soin de pouvoir dissocier ces deux types d'effets. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur des phénomènes locaux qui suggèrent principalement le rôle de facteurs visuomoteurs. Il s'agissait d'une part des effets **I-OVP** et **OVP pour la refixation** (ou rOVP), qui montrent respectivement des variations de la durée des fixations et de la probabilité de refixer un mot en fonction de la position initiale de fixation dans le mot ([O'Regan et al., 1984](#); [O'Regan & Lévy-Schoen, 1987](#); [McConkie et al., 1988](#); [Vitu et al., 2001](#)). Il s'agissait d'autre part de l'**effet du site de départ**, qui témoigne des variations de la position d'atterrissage des saccades dans un mot en fonction de la distance de la fixation précédente par rapport au mot

Les effets I-OVP et rOVP sont des phénomènes étroitement liés qui s'observent tous les deux sur le comportement oculomoteur intra-mots. Le phénomène I-OVP montre que la durée des fixations est maximale lorsque la position de fixation initiale est légèrement à gauche du centre des mots, puis qu'elle diminue lorsque le regard s'éloigne de cette position ([Vitu et al., 2001](#)). De façon symétrique, la probabilité de refixer un mot tend à être minimale lorsque le regard fixe initialement le centre du mot, puis augmente lorsque la fixation se situe sur les extrémités du mot (phénomène rOVP, [O'Regan et al., 1984](#); [McConkie et al., 1989](#); [Vitu et al., 1990](#)). Même si certaines hypothèses liées au traitement lexical ont été proposées pour rendre compte des effets I-OVP (e.g., [McDonald et al., 2005](#)), et rOVP (e.g. [Reichle et al., 2003](#)), la majorité des données empiriques semble plutôt favoriser une interprétation en termes de mécanismes de bas niveau. Nuthmann et al. ([2005](#), [2007](#)) ont proposé que ces deux phénomènes seraient le reflet d'erreurs de visée du système oculomoteur : lorsque le regard atterrit sur les extrémités du mot, c'est parfois parce que l'amplitude de la saccade a été mal calculée (voir aussi [Engbert et al., 2005](#)). Le système va donc écourter la fixation initiale et programmer une nouvelle saccade, qui selon l'avancement du traitement au moment où elle est initiée sera soit en direction de la position initialement prévue, le centre du mot visé, soit l'un des mots suivants. Ceci permet d'expliquer pourquoi la durée moyenne des fixations est plus courte, et la probabilité de refixation plus élevée, lorsque la première saccade atterrit au

début ou à la fin d'un mot. Une deuxième théorie explicative, proposée par Vitu et al. ([2001](#); [2007](#)), repose, elle, sur des stratégies d'économie perceptive mises en place lors de l'apprentissage de la lecture. Lors de l'atterrissage de la saccade, le système va rapidement estimer la qualité de la position de la fixation à partir d'indices visuels de bas niveau tels que la longueur du mot et la position des espaces inter-mots. Si la position de fixation est jugée optimale, la durée de la fixation va être prolongée, par une inhibition des saccades précoces, de manière à favoriser la reconnaissance du mot.

L'étude du comportement oculomoteur inter-mot a aussi mis en évidence des variations de l'amplitude des saccades en fonction de la position de la fixation précédente. L'effet du site de départ montre que la position d'atterrissage des saccades dans un mot dépend de la distance entre le point de départ de la saccade et le début (ou le centre) du mot ([McConkie et al., 1988](#) pour revue voir [Vitu et al., 2007](#)). Plus le site de départ est proche du mot, plus la saccade va avoir tendance à « sur-viser » le centre du mot et ainsi atterrir vers la fin du mot. Inversement, le déclenchement de saccades à partir de sites de départ éloignés va entraîner le regard vers le début des mots. L'interprétation de ce phénomène dépend aussi de la dominante cognitive ou visuomotrice de la théorie considérée. Les modèles et théories à dominante cognitive supposent que le système sélectionne un mot cible en vision périphérique et que le regard va viser le centre de ce mot, avec une proportion plus ou moins importante d'erreurs (e.g. [Reichle et al., 2003](#); [Engbert et al., 2005](#); pour des revues voir section 2-4-1-2; [Vitu, 2007](#)). Ces erreurs sont de deux types. Les premières sont des erreurs aléatoires, et résultent des imprécisions du système oculomoteur. Les secondes, mises en évidence par [McConkie et al. \(1988\)](#), sont des « erreurs de gamme », systématiques, reflétant la tendance à effectuer des saccades d'amplitude constante, optimale pour la tâche. Ce serait ces dernières qui seraient responsables de l'effet du site de départ. Le regard viserait le centre d'un mot cible, mais la tendance à effectuer des saccades d'amplitude moyenne (d'environ 7 lettres), entraînerait les yeux à « sur-viser » le centre du mot s'il est proche (i.e., s'il est à une excentricité inférieure à l'amplitude moyenne) et à sous-viser le centre du mot s'il est éloigné.

Selon d'autres théories, plutôt visuomotrices, il n'y a pas de sélection de cible à proprement parler ; la saccade va atterrir à une position plus ou moins éloignée de son point de départ, en fonction de facteurs visuels ou de régularités oculomotrices ([Yang & McConkie, 2001](#)). Selon [Vitu \(2008\)](#), l'effet du site de départ serait, en réalité, la conséquence d'un « effet global ». Ainsi, comme c'est le cas lors de tâches de visée de cible ([Findlay, 1982](#)), l'amplitude des saccades durant la lecture serait principalement déterminée par la

configuration visuelle présente en périphérie. Le système visuomoteur effectuerait des saccades en direction du centre de gravité d'une fenêtre d'intégration formée par un sous-ensemble de lettres situées à droite du point de fixation situées dans une fenêtre de taille fixe. La taille de la zone d'intégration serait fixe en degrés d'angle visuel et le centre de gravité serait pondéré par un facteur de magnification fovéale. Lorsque la saccade part d'une position éloignée par rapport à un mot donné, il y aurait plus de lettres à gauche qu'à droite du centre du mot et le regard aurait tendance à atterrir vers le début du mot. Inversement, lorsque le site de départ est proche du centre du mot, le regard serait attiré par les lettres situées à droite du centre et la saccade atterrirait vers la fin du mot.

L'effet du site de départ et les phénomènes I-OVP et rOVP, étant relativement indépendants des facteurs lexicaux, fournissaient un cadre idéal pour l'étude du rôle de la taille des lettres dans le processus de lecture. Tout d'abord, la manipulation de la taille des lettres devait permettre de distinguer les hypothèses interprétatives de l'effet du site de départ ; seule une interprétation en termes de centre de gravité prédisait une modulation de l'effet du site de départ en fonction de ce facteur. Nous comptons aussi, grâce à ce paradigme, apporter des informations complémentaires concernant l'origine des phénomènes I-OVP et rOVP ainsi que sur le déroulement temporel des étapes de traitement visuel des mots.

8-2-1-2 – Résultats et discussion

Notre étude sur le comportement oculomoteur en vision centrale (Chapitre 7) nous a tout d'abord permis de répliquer les effets I-OVP et rOVP, ainsi que l'effet du site de départ. De façon plus surprenante au vu de la littérature, la forme de ces trois phénomènes variait en fonction de la taille des caractères.

L'effet de la taille des lettres sur **l'amplitude des saccades** peut se résumer de la façon suivante. Lorsque la taille des lettres diminuait, l'amplitude des saccades étaient en moyenne plus importantes, la probabilité de saut de mots plus élevée, et cela d'autant plus que les saccades étaient initiées d'une position proche du centre des mots, accentuant ainsi l'effet du site de départ. De tels effets ne peuvent être expliqués, a priori, en termes d'effet de gamme ([McConkie et al., 1988](#) voir aussi [Reichle et al., 2003](#); [Engbert et al., 2005](#)). Selon cette hypothèse, le système viserait le centre des mots mais l'amplitude des saccades serait biaisée par une tendance à effectuer des saccades d'amplitude moyenne, d'environ 7 lettres. De ce

fait, une modification de la taille des lettres n'aurait pas dû affecter l'amplitude des saccades et l'effet du site de départ, d'autant plus que nous avons veillé à ce que la taille des lettres soit la même au sein d'un bloc d'essais et donc que les gammes d'excentricité entre les petits et les grands caractères soient bien distinctes.

En revanche, les différences observées entre les deux tailles de lettres pourraient être attribuées à des variations de la visibilité des lettres. Il a par exemple été proposé par Legge et al. (1997b), que l'amplitude des saccades serait en majeure partie déterminée, en temps réel, par la taille de l'empan visuel. Cette hypothèse expliquerait donc l'augmentation de l'amplitude des saccades que nous avons observée par un empan visuel légèrement plus important pour les petits que pour les grands caractères. Néanmoins, comme nous l'avons vu, les données de Legge et al. (2007) ne prédisaient aucune variations de l'empan visuel pour la gamme de tailles testées. De plus, l'hypothèse d'un guidage oculaire par empan visuel/perceptif lors de la lecture en vision centrale, a été rejetée sur la base d'un ensemble d'arguments (pour une revue voir Vitu, 2007).

Les variations observées de l'effet du site de départ en fonction de la taille des lettres, sembleraient donc plutôt attribuables, comme le propose Vitu (2008), à des facteurs visuels de bas niveau, indépendants de l'identification des lettres. En effet, une hypothèse en termes d'effet global pourrait expliquer pourquoi les saccades atterrissent plus loin au sein des mots dans le cas des petits caractères. En supposant que le regard est dirigé vers le centre de gravité d'une zone d'intégration dont la taille angulaire est fixe, et que la position du centre de gravité est déterminée, entre autres, par le nombre de lettres comprises dans cette zone (voir aussi Vitu & Blanes, 2009 ; en préparation), on s'attend bien à des positions d'atterrissage (en lettres) plus éloignées pour les petits que pour les grands caractères et cela d'autant plus que le site de départ est proche du mot.

Nous avons aussi observé des effets de la taille des lettres sur la **durée des fixations** et **la probabilité de refixation** sur les mots, ainsi que des variations de la forme des courbes correspondant aux effets I-OVP et rOVP. La durée de la première fixation sur les mots (quel que soit le nombre de fixations avec lequel le mot avait été lu) était plus importante pour les petits que pour les grands caractères et cette différence augmentait à mesure que la position initiale de fixation s'éloignait du centre du mot, donnant un effet I-OVP plus aplati pour la petite taille de caractères. De plus, notre analyse de la durée de chacune des deux fixations successives réalisées dans le cas où le mot était refixé a révélé des effets différents de la taille

des lettres et des autres facteurs testés, selon la fixation considérée. La première fixation sur le mot, assez courte, était surtout influencée par la position de fixation (effet I-OVP), mais de façon plus importante pour les grands que pour les petits caractères. La durée de la deuxième fixation, plus longue, était quant à elle moins importante pour les mots courts, pour les mots de haute fréquence, et pour la grande taille de caractères. Elle diminuait aussi lorsque la position de la fixation précédente était plus proche du centre des mots, mais ce dernier effet n'était significatif que pour la grande taille de caractères. Parallèlement, l'analyse de l'effet OVP pour la refixation montrait une probabilité de refixation moins importante pour les petits que pour les grands caractères et ce, d'autant plus que la position initiale de fixation était proche des bords du mot.

Nous avons donc conclu, à partir de ces résultats, que la taille des caractères était un facteur visuel qui pouvait agir à deux étapes différentes du guidage oculomoteur, une première, plus précoce, faisant intervenir des facteurs visuomoteurs de bas niveau, et, une étape plus tardive, liée à la visibilité des lettres et, éventuellement à la taille de l'empan visuel. **Les effets plus précoces** de la taille de lettres, observés sur la durée des fixations initiales et plus spécifiquement sur la durée de la première fixation dans le cas où les participants refixaient le même mot, surviendraient en moyenne aux alentours de 219-295 ms. Ils moduleraient l'effet de la position du regard au sein du mot. En accord avec les hypothèses explicatives du phénomène I-OVP en termes de facteurs visuomoteurs de bas niveau, on peut supposer que la taille des lettres, lorsqu'elle est diminuée, rendrait plus difficile l'extraction d'indices visuels, tels que la position des espaces inter-mots et l'éloignement des lettres ([Nuthmann et al., 2005](#); [Vitu et al., 2007](#)). Etant donné que ces indices servent, a priori, à estimer la position du regard par rapport aux bords du mot, et décider sur cette base du moment de déclenchement de la saccade, la durée de la fixation serait de ce fait moins fortement dépendante de son emplacement dans le mot lorsqu'il est écrit en petits caractères. Une autre interprétation, en termes d'économie perceptive et motrice, de l'effet de la taille des lettres sur la forme des courbes I-OVP est aussi possible. Pour décider du moment de départ de la saccade, le système estimerait non seulement le temps nécessaire pour reconnaître le mot à partir de la position initiale du regard (voir [Vitu et al., 2007](#)) mais aussi le temps nécessaire à la programmation et à l'exécution d'une saccade de refixation. S'il est moins coûteux de rester à la position initiale, la fixation est prolongée et/ou le déclenchement d'une saccade précoce est inhibé. Au contraire, si la probabilité de reconnaître rapidement le mot est élevée, une nouvelle saccade est programmée rapidement, entraînant le regard le plus souvent vers

une position plus optimale pour la reconnaissance du mot, telle que son centre. Etant donnée que l'exécution d'une saccade précise est plus coûteuse en temps de programmation (pour une revue voir [Vitu, 2008](#)), nous pouvons supposer que plus la taille des caractères est réduite, plus le coût de programmation d'une saccade précise vers le centre du mot est élevé et plus le système choisit l'option de prolonger le temps de fixation plutôt que la programmation d'une saccade de refixation. Ceci expliquerait pourquoi, lorsque le regard fixe les bords du mot, la durée des fixations est plus importante et la probabilité de refixation, moins importante, pour les petits caractères. Il faut cependant noter que cette hypothèse ne permet pas d'expliquer la différence que l'on observe lorsque le regard fixe le centre des mots (la durée des fixations y est toujours plus importante pour les petits que pour les grands caractères), ni les effets observés sur la durée de la deuxième fixation.

Ces deux effets semblent plutôt liés à des **étapes de traitement plus tardives** qui dépendraient, elles, de la visibilité des lettres ainsi que de la longueur et de la fréquence des mots. Nous avons veillé à ce que la taille des lettres ne soit pas un facteur limitant pour l'identification des lettres en nous plaçant dans une gamme supérieure au CPS. Cependant, il est possible que les petites lettres, dans notre expérience, étaient plus difficiles à identifier et que ce soit la raison pour laquelle les durées de fixations sont plus longues, même lorsque les participants fixent le centre des mots. Dans le cas d'une refixation, ces étapes de traitement tardives pourraient débiter lors de la première fixation mais se dérouleraient principalement lors de la deuxième. Ceci expliquerait non seulement pourquoi la durée de la deuxième fixation est plus courte pour les grands caractères, et aussi pourquoi elle est encore plus courte lorsque la fixation précédente (i.e. la première) se trouvait proche du centre du mot. Il est en effet possible que le traitement visuel soit plus rapide et qu'il se termine plus tôt pour les grands caractères, surtout si la première fixation était déjà à une position optimale pour la reconnaissance du mot.

8-2-2 - Comportement oculomoteur en vision périphérique et stabilité de fixation

8-2-2-1 – Cadre théorique et questions posées

Les études menées en vision périphérique ont pu mettre en évidence l'influence de certains facteurs visuels, oculomoteurs mais aussi stratégiques sur les performances de lecture de patients DMLA ou de participants sains lisant avec un scotome artificiel. Lorsque la partie

centrale du champ visuel est masquée par la présence d'un scotome (naturel ou artificiel), les lecteurs sont contraints d'utiliser une zone périphérique de leur champ visuel pour identifier les mots. Cette zone, dont le choix se fait, le plus souvent, de façon spontanée est appelée PRL (pour *Preferred Retinal Locus*, [Cummins et al., 1985](#)). Les expériences mesurant les performances de lecture de texte en vision périphérique ont montré que, même lorsque la taille des lettres était suffisante (c'est-à-dire égale ou supérieure au CPS), la vitesse maximale de lecture diminuait lorsque la taille du scotome augmentait ([Rayner & Bertera, 1979](#); [Chung et al., 1998](#)). Cette diminution est attribuée, d'une part, aux contraintes visuelles que nous avons détaillées précédemment (section 2-2-1) et dont les effets augmentent avec l'excentricité, mais aussi à la diminution importante des performances oculomotrices. La programmation saccadique et la stabilité de fixation sont les deux composantes du comportement oculomoteur généralement altérées en vision périphérique.

Contrairement aux saccades utilisant la fovéa comme référence, les saccades visant à positionner une cible au niveau de la PRL ne sont pas innées ni automatiques ; elles nécessitent un effort cognitif plus important et sont moins rapides et moins précises qu'en vision centrale ([White & Bedell, 1990](#); [Whittaker Stephen G. et al., 1991](#); [Little et al., 2008](#)). Il a été montré que la vitesse de lecture de patients atteints de DMLA étaient positivement corrélée à leurs performances dans des tâches de séquençage de séries de lettres ([McMahon et al., 1991](#)), ce qui suggère que les performances de programmation saccadique sont un des facteurs limitants de la lecture en vision excentrée. La stabilité de fixation, mesurée habituellement durant une tâche de fixation de cible et représentée par l'aire de la BCEA (pour *Bivariate Contour Ellipse Area*), est aussi moins bonne en vision périphérique qu'en vision centrale. Il a été montré que l'aire de la BCEA mesurée en vision excentrée chez des participants sains ou des patients DMLA était de 3 à 10 fois plus importante qu'en vision centrale et que cette variable était aussi corrélée à la vitesse de lecture chez les patients atteints de DMLA ([Crossland et al., 2004a](#); [2009](#)). Mais, comme nous l'avons expliqué, ces résultats posent le problème d'être basés sur des corrélations entre des variables issues de tâches différentes : le séquençage de lettres, la fixation de cible isolée et la lecture de texte. Ils ne permettent donc pas d'affirmer qu'il existe un lien de causalité entre la stabilité de fixation (ou la programmation saccadique) et la vitesse de lecture. Toutefois, les expériences réalisées en oculométrie durant des tâches de lecture semblent confirmer le rôle limitant de ces deux facteurs. Les premières expériences menées chez les patients DMLA rapportent une forte corrélation entre l'amplitude des saccades progressives et la vitesse de lecture ([Rumney &](#)

[Leat, 1994](#); [Bullimore & Bailey, 1995](#); [Crossland & Rubin, 2006](#)). Ces résultats tendent à soutenir l'hypothèse proposée par Legge et al. ([1997a](#)) selon laquelle la diminution de l'empan visuel serait le principal facteur limitant la vitesse de lecture en vision excentrée, et que l'amplitude des saccades serait déterminée par les limites de l'empan visuel. Mais l'étude menée par Scherlen et al. ([2008](#)) sur des participants lisant avec un scotome artificiel rapporte des effets différents. Elle suggère que les principaux prédicteurs oculomoteurs de la vitesse de lecture seraient plutôt le nombre de saccades et, dans de moindres proportions, la durée des fixations. Les auteurs expliquent l'augmentation de la durée des fixations en termes de temps de traitement (voir aussi [Cheong et al., 2007, 2008](#)), mais suggèrent, en revanche, que l'augmentation du nombre de saccades serait plutôt due à l'instabilité de fixation et à des difficultés liées à la programmation saccadique.

Enfin, il a aussi été envisagé que la stratégie de lecture utilisée, notamment le choix de la position de la PRL, puisse influencer les performances de lecture et la qualité du contrôle oculomoteur en vision excentrée. Malgré l'absence de corrélation consistante entre position de la PRL et vitesse de lecture chez les patients DMLA (mais voir [Sunness et al., 1996](#)), plusieurs arguments théoriques et empiriques suggèrent qu'il serait plus avantageux d'utiliser une PRL verticale inférieure, c'est-à-dire de porter son attention en-dessous du scotome, pour lire un texte. Notamment, le fait de positionner son scotome au dessus de la ligne de texte permettrait de ne pas masquer la ligne de texte lue ni les lignes suivantes et d'avoir une vision plus globale du mot ([Duret et al., 1999](#)). Ces assertions tendent à être confirmées par les résultats d'études réalisées avec un scotome artificiel; celles-ci révèlent de meilleures performances perceptives mais aussi oculomotrices dans le champ visuel inférieur ([Fine & Rubin, 1999](#); [Petre et al., 2000](#); [Nilsson et al., 2003](#)).

Ainsi, les caractéristiques de l'activité oculomotrice et la qualité du contrôle oculomoteur semblent contribuer, en plus des contraintes perceptives, à la difficulté de lecture éprouvée par les patients DMLA et les participants lisant avec un scotome artificiel. Néanmoins, des études supplémentaires semblent encore nécessaires pour établir plus clairement le rapport de cause à effet entre performances oculomotrices et performances de lecture. L'étude que nous avons réalisée sur la lecture en vision périphérique (Chapitre 6) reprenait cet objectif; elle visait à déterminer les facteurs oculomoteurs limitant les performances de lecture en vision périphérique. Plus particulièrement, notre étude s'intéressait, par une manipulation de la stimulation visuelle fovéale, à déterminer l'impact de

la stabilité de fixation sur la vitesse de lecture pour des participants sains lisant avec un scotome.

8-2-2-2 - Résultats et discussion

L'expérience que nous avons réalisée sur la lecture en vision excentrée s'intéressait au lien entre la stabilité de fixation et la vitesse de lecture, et visait à déterminer si la présence d'une stimulation fovéale pouvait améliorer les performances de lecture. Elle reposait sur plusieurs résultats de la littérature montrant que, durant une tâche de fixation de cible en vision centrale, la dispersion des points de fixation augmentait avec la taille de la cible, et l'instabilité de fixation était encore plus importante en l'absence totale de cible visuelle (dans le noir) ([Morisita & Yagi, 2001](#)). Ces études suggérant que l'absence d'un stimulus contrasté de petite taille au niveau de la fovéa pouvait être responsable d'une diminution de la stabilité de fixation, nous avons testé l'effet d'une stimulation fovéale stable, composée d'un fond texturé, sur la vitesse de lecture de participants sains lisant avec un scotome artificiel. Nos résultats ont montré que la vitesse de lecture était améliorée en présence d'un masque ouvert sur le fond texturé, par rapport à la condition contrôle dans laquelle le masque était uniforme. Cependant, cette amélioration n'apparaissait qu'au bout de la quatrième session expérimentale. A cette session, le masque présentant une grande ouverture sur le fond entraînait une amélioration d'environ 12% de la vitesse de lecture pour toutes les tailles des caractères testées ($0,7^\circ$ à $1,1^\circ$), tandis que le masque présentant une petite ouverture sur le fond, n'améliorait la vitesse de lecture que pour la plus petite taille de lettre. Dans un deuxième temps, nous avons testé l'effet du type de masque sur la dispersion des positions du regard durant une fixation, dispersion que nous avons mesurée par l'aire de la BCEA par fixation (BCEApf). Nos données n'ont révélé aucune diminution de l'aire de cette BCEApf pour le type de masque ouvert, suggérant que l'amélioration de la vitesse de lecture ne serait pas due à une diminution de l'instabilité du regard durant la fixation. Ce résultat ne remet cependant pas en cause les corrélations, observées chez les patients DMLA, entre la stabilité de fixation mesurée durant une tâche de fixation de cible et la vitesse de lecture de texte ([Crossland et al., 2004a](#)). En effet, la BCEApf que nous avons étudiée ne reflète pas exactement les mêmes caractéristiques du comportement oculomoteur que la BCEA mesurée habituellement dans la littérature. La BCEApf mesure la dispersion des points au sein d'une fixation, c'est-à-dire uniquement les mouvements oculaires de faible amplitude

(microsaccades, microtremblements et dérives), tandis que la BCEA classique prend aussi en compte les saccades que les participants effectuent durant une tâche de fixation prolongée (voir [Castet & Crossland, 2012](#)). Il est donc possible, comme nous l'avons proposé, que les performances de lecture soient plutôt corrélées à la capacité à limiter le nombre et l'amplitude des saccades plutôt qu'à une réduction des mouvements oculaires apparaissant lors de la fixation.

Quels que soient les mécanismes sous-tendant cet effet de la stimulation fovéale sur la vitesse de lecture, nos résultats semblent encourager l'utilisation d'un paradigme similaire chez les patients atteints de DMLA. Cette méthode ne pourrait pas être utilisée par les patients porteurs d'un scotome absolu, mais elle peut, en revanche, servir à ceux présentant des scotomes dits « à îlots » dans lesquels de petites zones du champ visuel central sont encore utilisables. Si ces zones sont souvent trop réduites ou pas assez performantes pour l'identification de mots, elles pourraient, néanmoins être utilisées, comme c'est le cas dans notre expérience, pour percevoir une stimulation fovéale, et éventuellement, améliorer la performance de lecture. Un autre avantage de ce paradigme est qu'il fournit une aide visuelle ne nécessitant pas d'apprentissage volontaire ni la mise en place d'une stratégie oculomotrice consciente. Ceci présente une importance notable car les personnes atteintes de dégénérescence maculaire sont, pour la plupart, des personnes âgées qui ont parfois du mal à utiliser des aides visuelles trop complexes.

8-3 – CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail de thèse avait donc pour but d'étudier le rôle des facteurs visuels et oculomoteurs lors de la lecture au travers d'une approche globale des phénomènes observés en vision centrale et en vision périphérique. Une première partie de nos expériences a permis de mettre en évidence l'effet de différents paramètres visuels tels que le degré d'alignement horizontal du regard avec le centre des mots et la longueur des mots, sur les performances de reconnaissance de mots, tout en suggérant aussi un rôle important de la taille des lettres. Il s'est avéré que l'influence de ces paramètres variait de façon importante en fonction de l'excentricité de fixation. Nous avons donc conclu que l'identification des lettres et des mots dépendait en grande partie des variations de l'acuité visuelle, de l'encombrement et du temps de traitement en fonction du degré d'excentricité rétinienne. En plus d'apporter des données complémentaires pour l'élaboration des modèles explicatifs de l'effet OVP et de la lecture en

général, nos résultats montrent la nécessité de contrôler la taille des caractères dans les expériences mesurant les performances de reconnaissance de lettres et de mots en vision périphérique. Ils suggèrent notamment qu'en plus du temps de présentation, les mesures de l'empan visuel dépendent fortement de la taille de caractères choisie et que le fait de compenser l'excentricité verticale par une magnification de la taille des lettres ne serait pas toujours sans conséquence sur les performances de lecture.

Dans le but d'une compréhension globale des mécanismes de la lecture, il serait donc nécessaire, dans un premier temps, de réévaluer la taille de l'empan visuel, en vision centrale et en vision périphérique, et sans compensation de l'excentricité verticale des lettres par leur taille. Cette expérience permettrait de compléter l'étude paramétrique réalisée par Legge et al. (2001), et mettrait probablement en évidence l'effet que suggère nos résultats, soit une légère augmentation de la taille de l'empan visuel lorsque l'excentricité verticale augmente (dans une gamme modérée) et que la taille des lettres est maintenue constante. La présence d'un tel effet remettrait aussi en question le choix, communément adopté dans les études des performances de lecture en vision excentrée, de fixer la taille des caractères à 2 ou 2,5 fois le CPS de chaque participant.

Le deuxième aspect de la lecture que nous avons abordé, et qui est indissociable du premier, concerne les aspects oculomoteurs de la lecture. Au travers de l'étude de l'effet d'un paramètre visuel, la taille des caractères, sur les mouvements oculaires en vision centrale, nous avons tout d'abord pu répliquer la plupart des phénomènes observés sur le comportement oculomoteur intra et inter-mots, tels que les effets I-OVP, rOVP et l'effet du site de départ. Mais surtout, nous avons montré, contrairement à ce qui est admis depuis très longtemps, que la taille des caractères pouvait influencer le comportement oculomoteur en vision centrale. Nous avons aussi conclu de cette expérience que l'amplitude des saccades et la durée des fixations étaient principalement déterminées par des facteurs visuomoteurs de bas niveau, mais que les durées des fixations pouvaient cependant être modulées, au moins pour les plus longues, par le traitement visuel et lexical.

Nous avons choisi de mener cette expérience dans le but de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu en vision centrale avant d'aborder l'étude du comportement oculomoteur intra- et inter-mot en vision périphérique. Même si, pour les raisons que nous avons détaillées dans l'introduction, une étude similaire serait difficile à appliquer à la lecture avec un scotome maculaire, il serait toutefois possible de mettre en place une expérience

utilisant un scotome artificiel hémichamp et permettant de mesurer la position horizontale du regard par rapport au centre des mots lorsque les participants positionnent leur scotome au-dessus ou en dessous de la ligne de texte. Ceci permettrait d'étudier le devenir des effets OVP, I-OVP/rOVP et de l'effet du site de départ en vision excentrée et de voir dans quelles mesures leurs variations peuvent être prédites par les théories actuelles du guidage oculomoteur en vision centrale. Cette étude permettrait aussi de voir si la réduction du phénomène OVP dans le champ visuel inférieur, comme nous l'avons observée dans une tâche d'identification perceptive, se généralise à l'effet rOVP pour la refixation, ainsi qu'à l'effet I-OVP pour les durées de fixation. Par ailleurs, une manipulation conjointe de la taille des lettres renseignerait d'autant plus le lien entre comportement oculomoteur et traitement de l'information pour la lecture en vision périphérique.

La deuxième expérience que nous avons menée en oculométrie concernait, elle, la lecture en vision périphérique en présence d'un scotome maculaire et l'influence de la stabilité de fixation sur les performances de lecture. Nous avons obtenu un résultat encourageant montrant un effet positif de la présence d'une stimulation fovéale sur la vitesse de lecture. L'analyse de la stabilité des positions du regard au sein de la fixation n'ayant pas apporté de résultats convaincants, il nous reste encore à étudier de manière plus approfondie les données recueillies afin de déterminer les mécanismes sous-tendant cet effet. Cette étude, ainsi que notre expérience sur la reconnaissance des mots en vision périphérique, ont suggéré des implications pour la lecture avec scotome. En effet, il apparaît que la lecture en vision périphérique, pour des patients ayant un scotome maculaire avec « îlots », serait facilitée par l'ajout d'un fond texturé en vision fovéale. De plus, dans l'aide à la mise en place de stratégies adaptives pour la lecture, il ne semblerait pas nécessaire d'insister sur la nécessité pour le patient d'aligner son regard avec le centre des mots, tout au moins beaucoup moins que si l'on cherchait à apprendre à lire à un participant visuellement sain.

La conclusion principale de ce travail reste néanmoins qu'une avancée des connaissances sur la lecture en vision centrale et périphérique devrait bénéficier d'une approche conjointe, telle que celle proposée dans ce travail de thèse.

REFERENCES

- Abraham, P., Yue, H. & Wilson, L. (2010). Randomized, double-masked, sham-controlled trial of ranibizumab for neovascular age-related macular degeneration: PIER study year 2. *American Journal of Ophthalmology*, 150(3), 315-324.
- Abrams, R. A., Meyer, D. E. & Kornblum, S. (1989). *Speed and accuracy of saccadic eye movements: characteristics of impulse variability in the oculomotor system* (Vol. 15). Washington, DC, ETATS-UNIS: American Psychological Association.
- Achard, O. A., Safran, A. B., Duret, F. C. & Ragama, E. (1995). *Role of the completion phenomenon in the evaluation of Amsler grid results* (Vol. 120). New York, NY, ETATS-UNIS: Elsevier.
- Akutsu, H., Legge, G. E., Ross, J. A. & Schuebel, K. J. (1991). Psychophysics of reading: X. Effects of age-related changes in vision. *Journals of Gerontology*, 46(6), P325-P331.
- Altpeter, E., Mackeben, M. & Trauzettel-Klosinski, S. (2000). The importance of sustained attention for patients with maculopathies. *Vision research*, 40(10-12), 1539-1547.
- Andrews, S. (1989). Frequency and neighborhood effects on lexical access: Activation or search? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(5), 802-814.
- Armaly, M. F. (1969). The Size and Location of the Normal Blind Spot. *Arch Ophthalmol*, 81(2), 192-201.
- Babkoff, H., Genser, S. & Hegge, F. W. (1985). Lexical decision, parafoveal eccentricity and visual hemifield. *Cortex*, 21(4), 581-593.
- Bahill, A. T., Clark, M. R. & Stark, L. (1975). The main sequence, a tool for studying human eye movements. *Mathematical Biosciences*, 24, 191-204.
- Baker, C. I., Dilks, D. D., Peli, E. & Kanwisher, N. (2008). Reorganization of visual processing in macular degeneration: Replication and clues about the role of foveal loss. *Vision research*, 48(18), 1910-1919.
- Baker, C. I., Peli, E., Knouf, N. & Kanwisher, N. G. (2005). Reorganization of Visual Processing in Macular Degeneration. *The Journal of Neuroscience*, 25(3), 614-618.
- Balota, D. A., Pollatsek, A. & Rayner, K. (1985). The interaction of contextual constraints and parafoveal visual information in reading. *Cognitive Psychology*, 17(3), 364-390.
- Balota, D. A., Yap, M. J., Cortese, M. J., Hutchison, K. A., Kessler, B., Loftis, B. et al. (2007). The English Lexicon Project. *Behavior Research Methods*, 39, 445-459.
- Battista, J. & Kalloniatis, M. (2002). Left-right word recognition asymmetries in central and peripheral vision. *Vision Research*, 42(12), 1583-1592.
- Bernard, J.-B. & Chung, S. T. L. (2011). The dependence of crowding on flanker complexity and target-flanker similarity. *Journal of Vision*, 11(8).
- Bernard, J.-B., Moscoso del Prado Martin, F., Montagnini, A. & Castet, E. (2008). *A model of optimal oculomotor strategies in reading for normal and damaged visual fields*. Paper presented at the second french conference on Computational Neuroscience : Neurocomp 2008, Marseille, France.
- Bernard, J.-B., Scherlen, A.-C. & Castet, E. (2007). Page mode reading with simulated scotomas: A modest effect of interline spacing on reading speed. *Vision Research*, 47(28), 3447.
- Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H. et al. (2009). Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(3), 127-135.
- Boucart, M., Dinon, J.-F., Despretz, P., Desmettre, T., Hladiuk, K. & Oliva, A. (2008). Recognition of facial emotion in low vision: A flexible usage of facial features. *Visual Neuroscience*, 25(04), 603-609.
- Bouma, H. (1969). Visual isolation in eccentric vision: The role of colour. *IPO Annual Progress Report*, 4, 95-99.
- Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, 226(5241), 177-178.
- Bouma, H. (1973). Visual interference in the parafoveal recognition of initial and final letters of words. *Vision Research*, 13(4), 767-782.
- Bouma, H. & De Voogd, A. H. (1974). On the control of eye saccades in reading. *Vision research*, 14, 273-284.
- Bouma, H. & Legein, C. H. (1977). Foveal and parafoveal recognition of letters and words by dyslexics and by average readers. *Neuropsychologia*, 15(1), 69-80.
- Bowman, A. & Foster, P. (1992). *Density based exploration of bivariate data*. Glasgow: Department of Statistics, University of Glasgow.
- Bryden, M. P. (1970). Left-right differences in tachistoscopic recognition as a function of familiarity and pattern orientation. *Journal of Experimental Psychology*, 84(1), 120-122.

- Bryden, M. P. (1986). On the possible dangers of using horizontal word displays in visual field studies. *Brain and Cognition*, 5(3), 362-368.
- Brysaert, M. (1994). Interhemispheric transfer and the processing of foveally presented stimuli. *Behavioral Brain Research*, 64, 151-161.
- Brysaert, M. & d'Ydewalle, G. (1988). Callosal transmission in reading. In U. L. G. Luer, & J. Shallos-Hoffmann (Eds.), *Eye movement research: Physiological and psychological aspects*, 246-266. Göttingen: Hogrefe.
- Brysaert, M., Drieghe, D. & Vitu, F. (2005). Word skipping: Implications for theories of eye movement control in reading. In G. Underwood (Ed.), *Cognitive Processes in eye guidance*, 53-77: Oxford University Press.
- Brysaert, M. & Nazir, T. A. (2005). Visual constraints in written word recognition: evidence from the optimal viewing-position effect. *Journal of Research in Reading*, 28(3), 216.
- Brysaert, M. & Vitu, F. (1998). Word skipping: Implications for theories of eye movement control in reading. In G. Underwood (Ed.), *Eye guidance in Reading and Scene Perception*. Oxford: Elsevier.
- Brysaert, M., Vitu, F. & Schroyens, W. (1996). The right field visual advantage and the optimal viewing position effect: On the relation between foveal and parafoveal word recognition. *Neuropsychologia*, 10(3), 385-395.
- Bullimore, M. A. & Bailey, I. L. (1995). Reading and eye movements in age-related maculopathy. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*, 72(2), 125-138.
- Buser, P. & Imbert, M. (1987). *Vision*.
- Calabrèse, A. (2011). *Désorganisation fonctionnelle des systèmes oculomoteur et visuo-attentionnel chez les patients basse vision. Approche psychophysique.*, Université d'Aix-Marseille, Marseille.
- Calabrèse, A., Bernard, J.-B., Hoffart, L., Faure, G., Barouch, F., Conrath, J. et al. (2010). Small Effect of Interline Spacing on Maximal Reading Speed in Low-Vision Patients with Central Field Loss Irrespective of Scotoma Size. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 51(2), 1247-1254.
- Calabrèse, A., Bernard, J.-B., Hoffart, L., Faure, G., Barouch, F., Conrath, J. et al. (2011). Wet versus Dry Age-Related Macular Degeneration in Patients with Central Field Loss: Different Effects on Maximum Reading Speed. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 52(5), 2417-2424.
- Campbell, F. W. & Robson, J. G. (1968). Application of fourier analysis to the visibility of gratings. *The Journal of Physiology*, 197(3), 551-566.
- Cantone, A. R., Tillman, K. A. & Pelli, D. G. (2008). Eccentric features integrate slowly. *Journal of Vision*, 8(6), 653.
- Carrasco, M., McElree, B., Denisova, K. & Giordano, A. M. (2003). Speed of visual processing increases with eccentricity. [10.1038/nrn1079]. *Nature Neuroscience*, 6(7), 699-700.
- Carver, R. P. (1989). What does maximum oral reading rate measure ? *Yearbook of the national reading conference*, 38, 421-425.
- Carver, R. P. (1990). *Reading rate: A review of research and theory*. San Diego, CA, US: Academic Press.
- Casteau, S. & Vitu, F. (2012). On the effect of remote and proximal distractors on saccadic behavior: A challenge to neural-field models. *Journal of Vision*, 12(12).
- Castet, E. (2010). Perception of Intra-saccadic Motion. In U. J. Ilg & G. S. Masson (Eds.), *Dynamics of Visual Motion Processing*, 213-238. Boston, MA: Springer US.
- Castet, E. & Crossland, M. D. (2012). Quantifying eye stability during a fixation task: A review of definitions and methods. *Seeing and Perceiving*, 25, 449-469.
- Chanceaux, M., Vitu, F., Bendahman, L., Thorpe, S. & Grainger, J. (2012). Word processing speed in peripheral vision measured with a saccadic choice task. *Vision research*, 56(0), 10-19.
- Chaudhuri, P. & Marron, J. S. (1999). Sizer for exploration of structures in curves. *Journal of the American Statistical Association*.
- Cheong, A. M. Y., Legge, G. E., Lawrence, M. G., Cheung, S.-H. & Ruff, M. A. (2007). Relationship between slow visual processing and reading speed in people with macular degeneration. *Vision research*, 47(23), 2943-2955.
- Cheong, A. M. Y., Legge, G. E., Lawrence, M. G., Cheung, S.-H. & Ruff, M. A. (2008). Relationship between visual span and reading performance in age-related macular degeneration. *Vision research*, 48(4), 577-588.
- Cheung, S. H. & Legge, G. E. (2005). Functional and cortical adaptations to central vision loss. *Visual Neuroscience*, 22(02), 187-201.
- Chung, S. T. L. (2002). The effect of letter spacing on reading speed in central and peripheral vision. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 43(4), 1270-1276.
- Chung, S. T. L. (2004). Reading Speed Benefits from Increased Vertical Word Spacing in Normal Peripheral Vision. *Optometry & Vision Science*, 81(7), 525-535.

- Chung, S. T. L., Jarvis, S. H., Woo, S. Y., Hanson, K. & Jose, R. T. (2008). Reading Speed Does Not Benefit from Increased Line Spacing in AMD Patients. *Optometry & Vision Science*, 85(9), 827-833
810.1097/OPX.1090b1013e31818527ea.
- Chung, S. T. L., Legge, G. E. & Cheung, S. H. (2004). Letter-recognition and reading speed in peripheral vision benefit from perceptual learning. *Vision research*, 44(7), 695-709.
- Chung, S. T. L., Mansfield, J. S. & Legge, G. E. (1998). Psychophysics of reading. XVIII. The effect of print size on reading speed in normal peripheral vision. *Vision research*, 38(19), 2949-2962.
- Clark, J. J. & O'Regan, J. K. (1999). Word ambiguity and the optimal viewing position in reading. *Vision Research*, 39(4), 843.
- Cleveland, W. S. (1981). LOWESS: A program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression. *The American Statistician*, 35, 54.
- Coëffé, C. & O'Regan, J. K. (1987). Reducing the influence of non-target stimuli on saccade accuracy: Predictability and latency effects. *Vision research*, 27(2), 227-240.
- Cohen, S. Y., Lamarque, F., Saucet, J.-C., Provent, P., Langram, C. & LeGargasson, J.-F. (2003). Filling-in phenomenon in patients with age-related macular degeneration: differences regarding uni- or bilaterality of central scotoma. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 241(10), 785-791.
- Cohen, S. Y. & Legargasson, J.-F. (2005). Adaptation au scotome central : partie II: Complétion visuelle des scotomes centraux. *Journal Français d'Ophtalmologie*, 28(10), 1131-1136.
- Coltheart, M., Davelaar, E., Jonasson, J. T. & Besner, D. (1977). Access to the internal lexicon. In S. Dornic (Ed.), *Attention and Performance VI*. London: Academic Press.
- Coppola, D. & Purves, D. (1996). The extraordinarily rapid disappearance of entopic images. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(15), 8001-8004.
- Coren, S. & Hoenig, P. (1972). Effects of non-target stimuli upon length of voluntary saccades. *Perceptual and Motor Skills*, 34(2), 499-508.
- Cornsweet, T. N. & Crane, H. D. (1973). Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth Purkinje images. *Journal of the Optical Society of America*, 63(8), 921-928.
- Cowey, A. & Rolls, E. T. (1974). Human cortical magnification factor and its relation to visual acuity. *Experimental Brain Research*, 21(5), 447-454.
- Crossland, M. D. & Bex, P. J. (2008). The twinkle aftereffect is pre-cortical and is independent of filling-in. *Journal of Vision*, 8(11).
- Crossland, M. D., Culham, L. E., Kabanarou, S. A. & Rubin, G. S. (2005a). Preferred Retinal Locus development in patients with macular disease. *Ophthalmology*, 112(9), 1579.
- Crossland, M. D., Culham, L. E. & Rubin, G. S. (2004a). Fixation stability and reading speed in patients with newly developed macular disease. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 24(4), 327-333.
- Crossland, M. D., Culham, L. E. & Rubin, G. S. (2005b). Predicting reading fluency in patients with macular disease. *Optometry & Vision Science*, 82(1), 11-17.
- Crossland, M. D., Dunbar, H. M. P. & Rubin, G. S. (2009). Fixation stability measurement using the Mp1 microperimeter. *Retina*, 29(5), 651-656.
- Crossland, M. D. & Rubin, G. S. (2006). Eye movements and reading in macular disease: Further support for the shrinking perceptual span hypothesis. *Vision Research*, 46(4), 590.
- Crossland, M. D., Sims, M., Galbraith, R. F. & Rubin, G. S. (2004b). Evaluation of a new quantitative technique to assess the number and extent of preferred retinal loci in macular disease. *Vision research*, 44(13), 1537-1546.
- Cummings, R. W., Whittaker, S. G., Watson, G. R. & Budd, J. M. (1985). Scanning characters and reading with a central scotoma. *Am J Optom Physiol Opt*, 62, 833 - 843.
- Curcio, C. A., Sloan, K. R., Kalina, R. E. & Hendrickson, A. E. (1990). Human photoreceptor topography. *Journal of Comparative Neurology* 292(4), 497-523.
- Davis, C. J., Perea, M. & Acha, J. (2009). Re(de)fining the orthographic neighborhood: The role of addition and deletion neighbors in lexical decision and reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(5), 1550-1570.
- de Jong, P. T. V. M. (2006). Age-Related Macular Degeneration. *New England Journal of Medicine*, 355(14), 1474-1485.
- De Weerd, P., Gattass, R., Desimone, R. & Ungerleider, L. G. (1995). Responses of cells in monkey visual cortex during perceptual filling-in of an artificial scotoma. [10.1038/377731a0]. *Nature*, 377(6551), 731-734.
- Dempster, A. P., Laird, N. M. & Rubin, D. B. (1977). Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 39(1), 1-38.

- Déruaz, A., Matter, M., Whatham, A. R., Goldschmidt, M., Duret, F. C., Issenhuth, M. et al. (2004). Can fixation instability improve text perception during eccentric fixation in patients with central scotomas? *British Journal of Ophthalmology*, 88(4), 461-463.
- Déruaz, A., Whatham, A. R., Mermoud, C. & Safran, A. B. (2002). Reading with multiple preferred retinal loci: implications for training a more efficient reading strategy. *Vision Research*, 42, 2947 - 2957.
- Deubel, H., Wolf, W. & Hauske, G. (1984). The evaluation of the oculomotor error signal. In A. G. Gale & F. Johnson (Eds.), *Theoretical and Applied Aspects of Eye Movement Research*. Amsterdam: Elsevier.
- Dodge, R. (1900). Visual perception during eye movement. *Psychological Review*, 7(5), 454-465.
- Dunbar, H. M. P., Crossland, M. D. & Rubin, G. S. (2010). Fixation stability: A comparison between the Nidek MP-1 and the Rodenstock Scanning Laser Ophthalmoscope in persons with and without diabetic maculopathy. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 51(8), 4346-4350.
- Duncan, R. O. & Boynton, G. M. (2003). Cortical Magnification within Human Primary Visual Cortex Correlates with Acuity Thresholds. *Neuron*, 38(4), 659-671.
- Duret, F. C., Issenhuth, M. & Safran, A. B. (1999). Combined use of several preferred retinal loci in patients with macular disorders when reading single words. *Vision Research*, 39, 873 - 879.
- Engbert, R., Nuthmann, A., Richter, E. M. & Kliegl, R. (2005). SWIFT: A Dynamical Model of Saccade Generation During Reading. *Psychological Review*, 112(4), 777-813.
- Farah, M. J. (1990). *Visual Agnosia: Disorders of Object Recognition and What They Tell Us About Normal Vision*: MIT Press.
- Farid, M. & Grainger, J. (1996). How initial fixation position influences visual word recognition: A comparison of French and Arabic. *Brain and Language*, 53(3), 351-368.
- Ferrand, L. (2007). *Psychologie cognitive de la lecture: Reconnaissance des mots écrits chez l'adulte*: De Boeck Université.
- Ferris, F. L., III, Fine, S. L. & Hyman, L. (1984). Age-Related Macular Degeneration and Blindness due to Neovascular Maculopathy. *Arch Ophthalmol*, 102(11), 1640-1642.
- Findlay, J. M. (1982). Global visual processing for saccadic eye movements. *Vision research*, 22(8), 1033-1045.
- Findlay, J. M. & Kapoula, Z. (1992). Scrutinization, Spatial Attention, and the Spatial Programming of Saccadic Eye Movements. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 45(4), 633-647.
- Findlay, J. M. & Walker, R. (1999). A model of saccade generation based on parallel processing and competitive inhibition. *Behavioral and Brain Sciences*, 22, 661-674.
- Fine, E. M. & Rubin, G. S. (1999). Reading with simulated scotomas: attending to the right is better than attending to the left. *Vision research*, 39(5), 1039-1048.
- Fischer, B. & Weber, H. (1993). Express saccades and visual attention. *Behavioral and Brain Sciences*, 16(03), 553-567.
- Fischer, B., Weber, H., Biscaldi, M., Aiple, F., Otto, P. & Stuhr, V. (1993). Separate populations of visually guided saccades in humans: reaction times and amplitudes. *Experimental Brain Research*, 92(3), 528-541.
- Fletcher, D. C. & Schuchard, R. A. (1997). Preferred retinal loci relationship to macular scotomas in a low-vision population. *Ophthalmology*, 104(4), 632-638.
- Fletcher, D. C., Schuchard, R. A. & Watson, G. (1999). Relative locations of macular scotomas near the PRL: Effect on low vision reading. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 36(4), 356-364.
- Flom, M. C., Heath, G. G. & Takahashi, E. (1963). Contour interaction and visual resolution: Contralateral effects. *Science*, 142(3594), 979-980.
- Forster, K. I. (1976). Accessing the mental lexicon. In R. J. Wales & E. Walker (Eds.), *New approaches to language mechanisms*, 257-287. Amsterdam, North Holland.
- Forster, K. I. & Shen, D. (1996). No enemies in the neighborhood: Absence of inhibitory neighborhood effects in lexical decision and semantic categorization. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22(3), 696-713.
- Frasnelli, J., Collignon, O., Voss, P. & Lepore, F. (2011). Chapter 15 - Crossmodal plasticity in sensory loss. In C. E. C. J. F. K. Andrea M. Green & L. Franco (Eds.), *Progress in Brain Research*, 233-249: Elsevier.
- Frederiksen, J. R. & Kroll, J. F. (1976). Spelling and sound: Approaches to the internal lexicon. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2(3), 361-379.
- Frennesson, C. & Nilsson, S. E. (2007). The superior retina performs better than the inferior retina when reading with eccentric viewing: a comparison in normal volunteers. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 85(8), 868-870.
- Gilbert, C. D. & Wiesel, T. N. (1992). Receptive field dynamics in adult primary visual cortex. *Nature*, 356(6365), 150-152.
- Gilchrist, I. D. (2011). Saccades. In S. Liversedge, I. D. Gilchrist & S. Everling (Eds.), *Oxford Handbook of Eye Movements*, 85-95. Oxford, England.

- Goffart, L. (Ed.) (2009) *Encyclopedia of Neuroscience* (Vols. 8). Oxford: Academic Press.
- Goldberg, M. E. & Wurtz, R. H. (1972). Activity of superior colliculus in behaving monkey. I. Visual receptive fields of single neurons. *Journal of Neurophysiology*, 35(4), 542-559.
- Grainger, J. (1990). Word frequency and neighborhood frequency effects in lexical decision and naming. *Journal of Memory and Language*, 29(2), 228-244.
- Grainger, J. & Jacobs, A. M. (1996). Orthographic processing in visual word recognition: A multiple read-out model. *Psychological Review*, 103(3), 518-565.
- Grainger, J., Kiyonaga, K. & Holcomb, P. J. (2006). The Time Course of Orthographic and Phonological Code Activation. [Article]. *Psychological Science (Wiley-Blackwell)*, 17(12), 1021-1026.
- Grainger, J., O'Regan, J. K., Jacobs, A. M. & Segui, J. (1989). On the role of competing word units in visual word recognition: The neighborhood frequency effect. *Perception and Psychophysics*, 45, 189-195.
- Grainger, J., Tydgate, I. & Isselé, J. (2010). Crowding affects letters and symbols differently. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(3), 673-688.
- Grainger, J. & van Heuven, W. J. B. (2003). Modeling letter position coding in printed word perception. In P. Bonin (Ed.), *Mental lexicon: "Some words to talk about words"*. New York: Nova Science Publishers.
- Grantyn, A. & Grantyn, R. (1982). Axonal patterns and sites of termination of cat superior colliculus neurons projecting in the tecto-bulbo-spinal tract. *Experimental Brain Research*, 46(2), 243-256.
- Greenstein, V. C., Santos, R. A., Tsang, S. H., Smith, R. T., Barile, G. R. & Seiple, W. (2008). Preferred retinal locus in macular disease: characteristics and clinical implications. *Retina*, 28(9), 1234-1240.
- Guez, J. E., Le Gargasson, J. F., Rigaudiere, F. & O'Regan, J. K. (1993). Is there a systematic location for the pseudo-fovea in patients with central scotoma? *Vision research*, 33(9), 1271-1279.
- Haber, R. N. (1976). Control of eye movements in reading. In R. A. M. J. W. Senders (Ed.), *Eye movements and psychological processes*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Hannula, D. E., Simons, D. J. & Cohen, N. J. (2005). Imaging implicit perception: promise and pitfalls. [10.1038/nrn1630]. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(3), 247-255.
- Harland, S., Legge, G. E. & Luebker, A. (1998). Psychophysics of reading: XVII. Low-vision performance with four types of electronically magnified text. *Optometry and vision science : Official publication of the American Academy of Optometry*, 75(3), 183-190.
- Harris, M. & Wolpert, M. (2006). The main sequence of saccades optimizes speed-accuracy trade-off. *Biological Cybernetics*, 95(1), 21-29.
- Hauk, O., Davis, M. H., Ford, M., Pulvermüller, F. & Marslen-Wilson, W. D. (2006). The time course of visual word recognition as revealed by linear regression analysis of ERP data. *NeuroImage*, 30(4), 1383-1400.
- Hazel, C. A., Petre, K. L., Armstrong, R. A., Benson, M. T. & Frost, N. A. (2000). Visual Function and Subjective Quality of Life Compared in Subjects with Acquired Macular Disease. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 41(6), 1309-1315.
- He, S., Cavanagh, P. & Intriligator, J. (1996). Attentional resolution and the locus of visual awareness. [10.1038/383334a0]. *Nature*, 383(6598), 334-337.
- Holcomb, P. J. & Grainger, J. (2006). On the time course of visual word recognition: an event-related potential investigation using masked repetition priming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(10), 1631-1643.
- Holmes, G. (1919). the cortical localization of vision. *British Medical Journal*, 2, 193-199.
- Holmes, V. M. & O'Regan, J. K. (1987). Decomposing French words. In J. K. O'Regan & A. Lévy-Shoen (Eds.), *Eye movements: From physiology to cognition*. Amsterdam. North Holland.
- Horton, J. C. & Hoyt, W. F. (1991). The Representation of the Visual Field in Human Striate Cortex: A Revision of the Classic Holmes Map. *Arch Ophthalmol*, 109(6), 816-824.
- Howes, D. H. & Solomon, R. L. (1951). Visual duration threshold as a function of word-probability. *Journal of Experimental Psychology*, 41(6), 401-410.
- Huey, E. B. (1908). *The psychology and pedagogy of reading*.
- Humphreys, G. W., Evett, L. J. & Quinlan, P. T. (1990). Orthographic processing in visual word identification. *Cognitive Psychology*, 22(4), 517-560.
- Huntsman, L. A. & Lima, S. D. (2002). Orthographic Neighbors and Visual Word Recognition. *Journal of Psycholinguistic Research*, 31(3), 289-306.
- Jacobs, A. M. (1987). On localization and saccade programming. *Vision research*, 27(11), 1953-1966.
- Jacobs, A. M. & Grainger, J. (1992). Testing a semistochastic variant of the interactive activation model in different word recognition experiments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(4), 1174-1188.
- Javal, L. E. (1878). Essai sur la physiologie de la lecture. *Annales d'Oculistique*, 80, 240-274.
- Jay, M. F. & Sparks, D. L. (1987). Sensorimotor integration in the primate superior colliculus. I. Motor convergence. *Journal of Neurophysiology*, 57(1), 22-34.

- Johnston, J. C. & McClelland, J. L. (1974). Perception of letters in words: Seek not and ye shall find. *Science*, 184, 1192-1194.
- Jonas, J. B., Gusek, G. C. & Naumann, G. O. (1988). Optic disc, cup and neuroretinal rim size, configuration and correlations in normal eyes. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 29(7), 1151-1158.
- Jones, B. W. & Marc, R. E. (2005). Retinal remodeling during retinal degeneration. *Experimental Eye Research*, 81(2), 123-137.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: from eye fixation to comprehension. *Psychological Review*, 87, 329-354.
- Kaas, J. H., Krubitzer, L. A., Chino, Y. M., Langston, A. L., Polley, E. H. & Blair, N. (1990). Reorganization of retinotopic cortical maps in adult mammals after lesions of the retina. *Science (New York, N.Y.)*, 248(4952), 229-231.
- Kalesnykas, R. P. & Hallett, P. E. (1994). Retinal eccentricity and the latency of eye saccades. *Vision research*, 34(4), 517-531.
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H. & Jessel, T. M. (1991). Principles of Neural Science. *Elsevier Science*, 3rd edition.
- Kapoula, Z. (1985). Evidence for a range effect in the saccadic system. *Vision research*, 25(8), 1155-1157.
- Kapoula, Z. & Robinson, D. A. (1986). Saccadic undershoot is not inevitable: Saccades can be accurate. *Vision research*, 26(5), 735-743.
- Karim, A. K. & Kojima, H. (2010). The what and why of perceptual asymmetries in the visual domain. *Advances in cognitive psychology / University of Finance and Management in Warsaw*, 6, 103-115.
- Kennedy, A. & Pynte, J. (2005). Parafoveal-on-foveal effects in normal reading. *Vision research*, 45(2), 153-168.
- Kennedy, A., Pynte, J. & Ducrot, S. (2002). Parafoveal-on-foveal interactions in word recognition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 55(4), 1307-1337.
- Kerr, J. (1971). Visual resolution in the periphery. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 9(3), 375-378.
- Kliegl, R., Grabner, E., Rolfs, M. & Engbert, R. (2004). Length, frequency, and predictability effects of words on eye movements in reading. *The European Journal of Cognitive Psychology*, 16(1-2), 262-284.
- Kolers, P. A. (1976). Buswell's discoveries. In R. A. M. J. W. Senders (Ed.), *Eye movements and psychological processes*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kooi, F. L., Toet, A., Tripathy, S. P. & Levi, D. M. (1994). The effect of similarity and duration on spatial interaction in peripheral vision. *Spatial Vision*, 8(2), 255-279.
- Kowler, E. (1990). The role of visual and cognitive processes in the control of eye movement. In E. Kowler (Ed.), *Eye Movements and Their Role in Visual and Cognitive Processes*. Amsterdam: Elsevier.
- Kowler, E. & Blaser, E. (1995). The accuracy and precision of saccades to small and large targets. *Vision research*, 35(12), 1741-1754.
- Kowler, E. & Steinman, R. M. (1979). Miniature saccades: eye movements that do not count. *Vision research*, 19, 105-108.
- Krauzlis, R. J., Basso, M. A. & Wurtz, R. H. (1997). Shared motor error for multiple eye movements. *Science*, 276(5319), 1693-1695.
- Lamarre, M. (1892). Des mouvements des yeux dans la lecture. *Bulletins et Mémoires de la Société Française d'Ophthalmologie*, 10(354-364).
- Lavigne, F., Vitu, F. & d'Ydewalle, G. (2000). The influence of semantic context on initial eye landing sites in words. *Acta Psychologica*, 104(2), 191-214.
- Lee, H.-W., Legge, G. E. & Ortiz, A. (2003). Is word recognition different in central and peripheral vision? *Vision research*, 43(26), 2837-2846.
- Legge, G. E., Ahn, S. J., Klitz, T. S. & Luebker, A. (1997a). Psychophysics of reading. XVI. The visual span in normal and low vision. *Vision research*, 37(14), 1999-2010.
- Legge, G. E., Cheung, S. H., Yu, D., Chung, S. T. L., 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., Klitz, T. S. & Tjan, B. S. (1997b). Mr. Chips: An ideal-observer model of reading. *Psychological Review*, 104(3), 524-553.
- Legge, G. E., Mansfield, J. S. & Chung, S. T. L. (2001). Psychophysics of reading. XX. Linking letter recognition to reading speed in central and peripheral vision. *Vision Research*, 41(6), 725-743.
- Legge, G. E., Pelli, D. G., Rubin, G. S. & Schleske, M. M. (1985a). Psychophysics of reading. I. Normal vision. *Vision research*, 25(2), 239-252.
- Legge, G. E., Ross, J. A., Isenberg, L. M. & LaMay, J. M. (1992). Psychophysics of reading. XII. Clinical predictors of low-vision reading speed. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 33(3), 677-687.
- Legge, G. E., Rubin, G. S., Pelli, D. G. & Schleske, M. M. (1985b). Psychophysics of reading. II. Low vision. *Vision research*, 25(2), 253-265.

- Lei, H. & Schuchard, R. A. (1997). Using two preferred retinal loci for different lighting conditions in patients with central scotomas. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 38(9), 1812-1818.
- Leigh, R. J. & Kennard, C. (2004). Using saccades as a research tool in the clinical neurosciences. *Brain*, 127(3), 460-477.
- Levi, D. M. (2008). Crowding - An essential bottleneck for object recognition: A mini-review. *Vision research*, 48(5), 635-654.
- Levi, D. M., Klein, S. A. & Aitsebaomo, A. P. (1985). Vernier acuity, crowding and cortical magnification. *Vision Res*, 25(7), 963-977.
- Levi, D. M., Klein, S. A. & Hariharan, S. (2002). Suppressive and facilitatory spatial interactions in foveal vision: Foveal crowding is simple contrast masking. *Journal of Vision*, 2(2).
- Lévy-Shoen, A. (1969). Détermination et latence de la réponse oculomotrice à deux stimulus simultanés ou successifs selon leur excentricité relative. *L'Année Psychologique*, 69(2), 373-392.
- Lingnau, A., Schwarzbach, J. & Vorberg, D. (2008). Adaptive strategies for reading with a forced retinal location. *Journal of Vision*, 8(5).
- Little, D. M., Thulborn, K. R. & Szlyk, J. P. (2008). An fMRI study of saccadic and smooth-pursuit eye movement control in patients with Age-related Macular Degeneration. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 49(4), 1728-1735.
- Ludwig, C. J. H., Gilchrist, I. D. & McSorley, E. (2004). The influence of spatial frequency and contrast on saccade latencies. *Vision research*, 44(22), 2597-2604.
- Lund, R. D. (1972). Anatomic Studies on the Superior Colliculus. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 11(6), 434-441.
- Martelli, M., Majaj, N. J. & Pelli, D. G. (2005). Are faces processed like words? A diagnostic test for recognition by parts. *Journal of Vision*, 5(1).
- Martinez-Conde, S. (2006). Fixational eye movements in normal and pathological vision. In S. L. M. L. M. M. J. M. A. S. Martinez-Conde & P. U. Tse (Eds.), *Progress in Brain Research*, 151-176: Elsevier.
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L. & Hubel, D. H. (2004). The role of fixational eye movements in visual perception. [Article]. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(3), 229-240.
- May, P. J. (2006). The mammalian superior colliculus: laminar structure and connections. In J. A. Büttner-Ennever (Ed.), *Progress in Brain Research*, 321-378: Elsevier.
- McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of basic findings. *Psychological Review*, 88(5), 375-407.
- McConkie, G. W. (1979). On the role and control of eye movements in reading. In P. A. Kollers, M. E. Wrolstad & H. Bouma (Eds.), *Processing of visible language*, ?? New York: Plenum.
- McConkie, G. W., Kerr, P. W., Reddix, M. D. & Zola, D. (1988). Eye movement control during reading: I. The location of initial eye fixations on words. *Vision Research*, 28(10), 1107.
- McConkie, G. W., Kerr, P. W., Reddix, M. D., Zola, D. & Jacobs, A. M. (1989). Eye movement control during reading: II. Frequency of refixating a word. *Vision Research*, 46(3), 245-253.
- McConkie, G. W. & Rayner, K. (1975). The span of the effective stimulus during a fixation in reading. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 17(6), 578-586.
- McConkie, G. W. & Rayner, K. (1976). Asymmetry of the perceptual span in reading. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 8(5), 365-368.
- McDonald, S. A., Carpenter, R. H. S. & Shillcock, R. C. (2005). An Anatomically Constrained, Stochastic Model of Eye Movement Control in Reading. *Psychological Review*, 112(4), 814-840.
- McDowell, J. E., Dyckman, K. A., Austin, B. P. & Clementz, B. A. (2008). Neurophysiology and neuroanatomy of reflexive and volitional saccades: Evidence from studies of humans. *Brain and Cognition*, 68(3), 255-270.
- McIlwain, J. T. (1982). Lateral spread of neural excitation during microstimulation in intermediate gray layer of cat's superior colliculus. *Journal of Neurophysiology*, 47(2), 167-178.
- McMahon, T. T., Hansen, M. & Viana, M. (1991). Fixation characteristics in macular disease. Relationship between saccadic frequency, sequencing, and reading rate. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 32(3), 567-574.
- McMahon, T. T., Stelmack, J., Olivier, P. & Viana, M. A. G. (1993). Saccadic eye movements as a measure of the effect of low vision rehabilitation on reading rate. *Optometry & Vision Science*, 70(6), 506-510.
- Mendola, J. D., Conner, I. P., Sharma, S., Bahekar, A. & Lemieux, S. (2006). fMRI Measures of Perceptual Filling-in in the Human Visual Cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(3), 363-375.
- Mishkin, M. & Forgy, G. (1952). Word recognition as a function of retinal locus. *Journal of Experimental Psychology*, 43, 43-48.
- Morisita, M. & Yagi, T. (2001). The stability of human eye orientation during visual fixation and imagined fixation in three dimensions. *Auris, nasus, larynx*, 28(4), 301-304.

- Morrison, R. E. (1984). Manipulation of stimulus onset delay in reading: Evidence for parallel programming of saccades. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 667-682.
- Morrison, R. E. & Rayner, K. (1981). Saccade size in reading depends upon character spaces and not visual angle. *Perception & psychophysics*, 30(4), 395-396.
- Morton, J. (1969). Interaction of information in word recognition. *Psychological Review*, 76(2), 165-178.
- Moschovakis, A. K. (1996). The superior colliculus and eye movement control. *Current Opinion in Neurobiology*, 6(6), 811-816.
- Moses, R. A. & Hart, W. M. (1987). *Adler's Physiology of the eye, Clinical Application*. St. Louis: The C. V. Mosby Company.
- Munoz, D. P. & Wurtz, R. H. (1992). *Role of the rostral superior colliculus in active visual fixation and execution of express saccades* (Vol. 67). Bethesda, MD, ETATS-UNIS: American Physiological Society.
- Munoz, D. P. & Wurtz, R. H. (1993). Fixation cells in monkey superior colliculus. I: Characteristics of cell discharge. *Journal of Neurophysiology*, 70(2), 559-575.
- Nandy, A. S. & Tjan, B. S. (2007). The nature of letter crowding as revealed by first- and second-order classification images. *Journal of Vision*, 7(2).
- Nazir, T. A. (1992). Effects of lateral masking and spatial precueing on gap-resolution in central and peripheral vision. *Vision research*, 32(4), 771-777.
- Nazir, T. A. (2000). Traces of print along the visual pathway. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller & D. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process*. (pp. 3-22). Oxford: Elsevier.
- Nazir, T. A., Ben-Boutayab, N., Decoppet, N., Deutsch, A. & Frost, R. (2004). Reading habits, perceptual learning, and recognition of printed words. *Brain and Language*, 88(3), 294-311.
- Nazir, T. A., Heller, D. & Sussmann, C. (1992). Letter visibility and word recognition: the optimal viewing position in printed words. *Perception & psychophysics*, 52(3), 315-328.
- Nazir, T. A., Jacobs, A. M. & O'Regan, J. K. (1998). Letter legibility and visual word recognition. *Memory & cognition*, 26(4), 810-821.
- Nazir, T. A., O'Regan, J. K. & Jacobs, A. M. (1991). On words and their letters. *Bulletin of Psychonomic Society*, 29(2), 171-174.
- New, B., Ferrand, L., Pallier, C. & Brysbaert, M. (2006). Reexamining the word length effect in visual word recognition: new evidence from the English Lexicon Project. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(1), 45-52.
- New, B., Pallier, C., Ferrand, L. & Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet: LexiqueTM. *L'Année Psychologique*, 101, 447-462.
- Nilsson, U. L., Frennesson, C. & Nilsson, S. E. G. (2003). Patients with AMD and a large absolute central scotoma can be trained successfully to use eccentric viewing, as demonstrated in a scanning laser ophthalmoscope. *Vision research*, 43(16), 1777-1787.
- Nuthmann, A., Engbert, R. & Kliegl, R. (2005). Mislocated fixations during reading and the inverted optimal viewing position effect. *Vision research*, 45(17), 2201-2217.
- Nuthmann, A., Engbert, R. & Kliegl, R. (2007). The IOVP effect in mindless reading: Experiment and modeling. *Vision research*, 47(7), 990-1002.
- Nuthmann, A., Vitu, F., Kliegl, R. & Engbert, R. ((in prep.)). The saccadic range effect revisited: Implications for eye-movement control in reading.
- O'Regan, J. K. (1981). The convenient viewing position hypotheses. In: D.F. Fisher, R.A. Monty, & J.W. Senders, *Eye Movements: Cognition and Visual Perception*. L. Erlbaum, Hillsdale.
- O'Regan, J. K. (1990). Eye movements and reading. *Reviews of Oculomotor Research*, 4, 395-453.
- O'Regan, J. K. & Jacobs, A. M. (1992). Optimal viewing position effect in word recognition: A challenge to current theory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(1), 185-197.
- O'Regan, J. K. & Lévy-Schoen, A. (1987). Eye movement strategy and tactics in word recognition and reading. In M. Coltheart (Ed.), *Attention and performance XII: The psychology of reading*, 363-383. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- O'Regan, J. K., Levy-Schoen, A. & Jacobs, A. M. (1983). *The effect of visibility on eye-movement parameters in reading* (Vol. 34). Austin, TX, United States: Psychonomic Society.
- O'Regan, J. K., Levy-Schoen, A., Pynte, J. & Brugailere, B. (1984). Convenient fixation location within isolated words of different length and structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 10(2), 250-257.
- O'Regan, J. K. (1979). Saccade size control in reading: Evidence for the linguistic control hypothesis. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 25(6), 501-509.

- Østerberg, G. (1935). Topography of the layer of rods and cones in the human retina. *Acta Ophthalmologica, suppl. 6*, 1-103.
- Ottes, F. P., Van Gisbergen, J. A. M. & Eggermont, J. J. (1986). Visuomotor fields of the superior colliculus: A quantitative model. *Vision Research*, 26(6), 857-873.
- Paap, K. R., Newsome, S. L., McDonald, J. E. & Schvaneveldt, R. W. (1982). An activation-verification model for letter and word recognition: The word-superiority effect. *Psychological Review*, 89(5), 573-594.
- Parkes, L., Lund, J., Angelucci, A., Solomon, J. A. & Morgan, M. (2001). Compulsory averaging of crowded orientation signals in human vision. [10.1038/89532]. *Nat Neurosci*, 4(7), 739-744.
- Peli, E., Goldstein, R. B., Young, G. M., Trempe, C. L. & Buzney, S. M. (1991). Image enhancement for the visually impaired. Simulations and experimental results. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 32(8), 2337-2350.
- Pelli, D. G., Farell, B. & Moore, D. C. (2003). The remarkable inefficiency of word recognition. [10.1038/nature01516]. *Nature*, 423(6941), 752-756.
- Pelli, D. G., Palomares, M. & Majaj, N. J. (2004). Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection. *Journal of Vision*, 4(12).
- Pelli, D. G., Tillman, K. A., Freeman, J., Su, M., Berger, T. D. & Majaj, N. J. (2007). Crowding and eccentricity determine reading rate. *Journal of Vision*, 7(2).
- Perea, M. & Pollatsek, A. (1998). The effects of neighborhood frequency in reading and lexical decision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(3), 767-779.
- Petre, K. L., Hazel, C. A., Fine, E. M. & Rubin, G. S. (2000). Reading with eccentric fixation is faster in inferior visual field than in left visual field. *Optometry & Vision Science*, 77(1), 34-39.
- Petrov, Y., Popple, A. V. & McKee, S. P. (2007). Crowding and surround suppression: Not to be confused. *Journal of Vision*, 7(2).
- Pinheiro, J. C. & Bates, D. M. (2000). Mixed-effects models in S and S-Plus. *New York: Springer*.
- Ploner, C. J., Ostendorf, F. & Dick, S. (2004). *Target size modulates saccadic eye movements in humans* (Vol. 118). Washington, DC, Etats-Unis: American Psychological Association.
- Pollatsek, A., Bolozky, S., Well, A. D. & Rayner, K. (1981). Asymmetries in the perceptual span for Israeli readers. *Brain and Language*, 14(1), 174-180.
- Pollatsek, A., Juhasz, B. J., Reichle, E. D., Machacek, D. & Rayner, K. (2008). Immediate and delayed effects of word frequency and word length on eye movements in reading: A reversed delayed effect of word length. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(3), 726-750.
- Pollatsek, A., Perea, M. & Binder, K. S. (1999). The effects of "neighborhood size" in reading and lexical decision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(4), 1142-1158.
- Pollatsek, A., Raney, G. E., Lagasse, L. & Rayner, K. (1993). The use of information below fixation in reading and in visual search. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 47(2), 179-200.
- Pritchard, R. M. (1961). Stabilized images on the retina. *Scientific American*, 204(22), 72-78.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D. & et al., e. (2001). *Neuroscience. 2nd edition.*: Sunderland (MA): Sinauer Associates.
- R Development Core Team. (2008). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rastle, K. & Coltheart, M. (2008). Whammies and double whammies: The effect of length on nonword reading. *Psychonomic Bulletin & Review*, 5(2), 277-282.
- Rayner, K. (1979). Eye guidance in reading: Fixation location within words. *Perception*, 8, 21-30.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372-422.
- Rayner, K. & Bertera, J. H. (1979). Reading without a fovea. *Science*, 206, 468 - 469.
- Rayner, K., Binder, K. S., Ashby, J. & Pollatsek, A. (2001). Eye movement control in reading: word predictability has little influence on initial landing positions in words. *Vision research*, 41(7), 943-954.
- Rayner, K. & Duffy, S. (1986). Lexical complexity and fixation times in reading: Effects of word frequency, verb complexity, and lexical ambiguity. *Memory & cognition*, 14(3), 191-201.
- Rayner, K. & McConkie, G. W. (1976). What guides a reader's eye movements? *Vision research*, 16(8), 829-837.
- Rayner, K., Well, A. & Pollatsek, A. (1980). Asymmetry of the effective visual field in reading. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 27(6), 537-544.
- Reicher, G. M. (1969). Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, 81(2), 275-280.
- Reichle, E. D., Pollatsek, A., Fisher, D. L. & Rayner, K. (1998). Toward a model of eye movement control in reading. *Psychological Review*, 105(1), 125-157.

- Reichle, E. D., Rayner, K. & Pollatsek, A. (2003). The E-Z reader model of eye-movement control in reading: comparisons to other models. *The Behavioral and brain sciences*, 26(4), 445-476; discussion 477-526.
- Reilly, R. G. & Radach, R. (2006). Some empirical tests of an interactive activation model of eye movement control in reading. *Cognitive Systems Research*, 7(1), 34-55.
- Reinhard, J., Messias, A., Dietz, K., MacKeben, M., Lakmann, R., Scholl, H. P. N. et al. (2007). Quantifying fixation in patients with Stargardt disease. *Vision research*, 47(15), 2076-2085.
- Resnikoff, S., Pascolini, D., Etya'ale, D., Kocur, I., Pararajasegaram, R., Pokharel, G. P. et al. (2004). Global data on visual impairment in the year 2002. *Bulletin of the World Health Organization*, 82, 844-851.
- Risse, J. (1999). *Exploration de la fonction visuelle: Applications au domaine sensoriel de l'oeil normal et en pathologie.*: Masson.
- Robinson, D. A. (1972). Eye movements evoked by collicular stimulation in the alert monkey. *Vision Research*, 12(11), 1795-1808.
- Rolfs, M. & Vitu, F. (2007). On the limited role of target onset in the gap task: Support for the motor-preparation hypothesis. *Journal of Vision*, 7(10).
- Rosa, M. G. P. & Schmid, L. M. (1995). Magnification factors, receptive field images and point-image size in the superior colliculus of flying foxes: comparison with the primary visual cortex. *Experimental Brain Research*, 102(3), 551-556.
- Ross, L. & Ross, S. (1980). Saccade latency and warning signals: Stimulus onset, offset, and change as warning events. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 27(3), 251-257.
- Rubin, G. S. & Legge, G. E. (1989). Psychophysics of reading: VI. The role of contrast in low vision. *Vision research*, 29(1), 79-91.
- Rubin, G. S. & Turano, K. (1994). Low vision reading with sequential word presentation. *Vision research*, 34(13), 1723-1733.
- Rumelhart, D. E. & McClelland, J. L. (1982). An interactive activation model of context effects in letter perception: Part 2. The contextual enhancement effect and some tests and extensions of the model. *Psychological Review*, 89(1), 60-94.
- Rumney, N. J. & Leat, S. J. (1994). Why do low vision patients still read slowly with a low vision aid? In A. C. Kooijman (Ed.), *Low vision research and new developments in rehabilitation* 269-274. Amsterdam: IOS Press.
- Safran, A. B., Duret, F. C., Issenhuth, M. & Mermoud, C. (1999). Full text reading with a central scotoma: pseudo regressions and pseudo line losses. *British Journal of Ophthalmology*, 83(12), 1341-1347.
- Safran, A. B. & Landis, T. M. D. (1999). From Cortical Plasticity to Unawareness of Visual Field Defects. *Journal of Neuro-Ophthalmology*, 19(2), 84-88.
- Sansbury, R. V., Skavenski, A. A., Haddad, G. M. & Steinman, R. M. (1973). Normal fixation of eccentric targets. *Journal of the Optical Society of America*, 63(5), 612-614.
- Schade, O. H. (1956). Optical and photoelectric analog of the eye. *J Opt Soc Am*, 46(9), 721-739.
- Scherlen, A.-C., Bernard, J.-B., Calabrese, A. & Castet, E. (2008). Page mode reading with simulated scotomas: Oculo-motor patterns. *Vision Research*, 48(18), 1870.
- Schiller, P. H. (1965). Backward masking for letters. *Perceptual and Motor Skills*, 20(1), 47-50.
- Schuchard, R. A. & Fletcher, D. C. (1994). Preferred retinal locus, a review with application in low vision rehabilitation. *Ophthalmol Clin N Am*, 7, 243 - 256.
- Schuchard, R. A., Naseer, S. & de Castro, K. (1999). Characteristics of AMD Patients with Low Vision Receiving Visual Rehabilitation. [Article]. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 36(4), 294.
- Seiple, W., Szlyk, J. P., McMahon, T. T., Pulido, J. & Fishman, G. A. (2005). Eye-Movement Training for Reading in Patients with Age-Related Macular Degeneration. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 46(8), 2886-2896.
- Shapiro, S. S. & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611.
- Shima, N., Markowitz, S. N. & Reyes, S. V. (2010). Concept of a functional retinal locus in age-related macular degeneration. *Canadian Journal of Ophthalmology / Journal Canadien d'Ophthalmologie*, 45(1), 62-66.
- Silverman, B. W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis.* . London.
- Snellen, H. (1862). *Probebuchstaben zur Bestimmung der Sehschärfe*: Van de Weijer.
- Somani, S. & Markowitz, S. N. (2004). Identification of fixation location with retinal photography in macular degeneration. *Canadian journal of ophthalmology. Journal canadien d'ophthalmologie*, 39(5), 517-520.
- Sparks, D. L. (2002). The brainstem control of saccadic eye movements. [10.1038/nrn986]. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(12), 952-964.

- Sparks, D. L., Holland, R. & Guthrie, B. L. (1976). Size and distribution of movement fields in the monkey superior colliculus. *Brain Research*, 113(1), 21-34.
- Spoehr, K. T. & Smith, E. E. (1973). The role of syllables in perceptual processing. *Cognitive Psychology*, 5(1), 71-89.
- Steinman, R. M. (1965). Effect of target size, luminance, and color on monocular fixation. *Journal of the Optical Society of America*, 55(9), 1158-1164.
- Stevens, M. & Grainger, J. (2003). Letter visibility and the viewing position effect in visual word recognition. *Perception & Psychophysics*, 65(1), 133-151.
- Strasburger, H., Harvey, L. O. & Rentschler, I. (1991). Contrast thresholds for identification of numeric characters in direct and eccentric view. *Perception & psychophysics*, 49(6), 495-508.
- Sullivan, R. K. P., WoldeMussie, E. & Pow, D. V. (2007). Dendritic and Synaptic Plasticity of Neurons in the Human Age-Related Macular Degeneration Retina. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 48(6), 2782-2791.
- Sunness, J. S., Applegate, C. A., Haselwood, D. & Rubin, G. S. (1996). Fixation patterns and reading rates in eyes with central scotomas from advanced atrophic age-related macular degeneration and Stargardt disease. *Ophthalmology*, 103(9), 1458-1466.
- Sunness, J. S., Liu, T. & Yantis, S. (2004). Retinotopic mapping of the visual cortex using functional magnetic resonance imaging in a patient with central scotomas from atrophic macular degeneration. *Ophthalmology*, 111(8), 1595-1598.
- Timberlake, G. T., Mainster, W. A., Peli, E., Augliere, R. A., Essock, E. A. & Arend, L. E. (1986). Reading with a macular scotoma. I. Retinal location of scotoma and fixation area. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 27, 1137 - 1147.
- Timberlake, G. T., Peli, E., Essock, E. A. & Augliere, R. A. (1987). Reading with a macular scotoma. II. Retinal locus for scanning text. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 28, 1268 - 1274.
- Timberlake, G. T., Wyman, D., Skavenski, A. A. & Steinman, R. M. (1972). The oculomotor error signal in the fovea. *Vision Res*, 12(5), 1059-1064.
- Toet, A. & Levi, D. M. (1992). The two-dimensional shape of spatial interaction zones in the parafovea. *Vision research*, 32(7), 1349-1357.
- Townsend, J. T., Taylor, S. G. & Brown, D. R. (1971). Lateral masking for letters with unlimited viewing time. *Perception & Psychophysics*, 10, 375-378.
- Turano, K. A., Broman, A. T., Bandeen-Roche, K., Munoz, B., Rubin, G. S., WEST, S. K. et al. (2004). Association of Visual Field Loss and Mobility Performance in Older Adults: Salisbury Eye Evaluation Study. *Optometry & Vision Science*, 81(5), 298-307.
- Van Rensbergen, J. & De Troy, A. (1993). *A reference guide for the Leuven dual-PC controlled Purkinje eyetracking system. (Psych. Rep. No. 145)*. Leuven, Belgium: Laboratory of Experimental Psychology, University of Leuven.
- Varsori, M., Perez-Fornos, A., Safran, A. B. & Whatham, A. R. (2004). Development of a viewing strategy during adaptation to an artificial central scotoma. *Vision research*, 44(23), 2691-2705.
- Venables, W. N. & Ripley, B. D. (2002). *Modern Applied Statistics with S*: Springer.
- Virsu, V. & Rovamo, J. (1979). Visual resolution, contrast sensitivity, and the cortical magnification factor. *Experimental Brain Research*, 37(3), 475-494.
- Vitu, F. (1991a). Against the existence of a range effect during reading. *Vision research*, 31(11), 2009-2015.
- Vitu, F. (1991b). The existence of a center of gravity effect during reading. *Vision Research*, 31((7/8)), 1289-1313.
- Vitu, F. (1991c). The influence of parafoveal preprocessing and linguistic context on the optimal landing position effect. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 50(1), 58-75.
- Vitu, F. (2007). *Vers un modèle écologique de la vision active. Volume I - Synthèse*. Université de Provence, Aix-Marseille I, Marseille.
- Vitu, F. (2008). About the global effect and the critical role of retinal eccentricity: Implications for eye movements in reading. *Journal of Eye Movement Research*, 2((3):6), 1-18.
- Vitu, F. (2011). On the role of visual and oculomotor processes in reading. Press. In S. P. Liversedge, I. D. Gilchrist & S. Everling (Eds.), *Handbook on Eye Movements*: Oxford University.
- Vitu, F. & Blanes, C. (2009). *From the global effect to eye movements in reading: The missing link*. Paper presented at the 15th European conference on eye movements (ECEM).
- Vitu, F., Brysbaert, M. & Lancelin, D. (2004a). A test of parafoveal-on-foveal effects with pairs of orthographically related words. *The European Journal of Cognitive Psychology*, 16(1-2), 154-177.
- Vitu, F., Kapoula, Z., Lancelin, D. & Lavigne, F. (2004b). Eye movements in reading isolated words: Evidence for strong biases towards the center of the screen. *Vision Research*, 44(3), 321-338.

- Vitu, F., Lancelin, D., Jean, A. & Farioli, F. (2006). Influence of foveal distractors on saccadic eye movements: A dead zone for the global effect. *Vision research*, 46(28), 4684-4708.
- Vitu, F., Lancelin, D. & Marrier d'Unienville, V. (2007). A perceptual-economy account for the inverted-optimal viewing position effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(5), 1220-1249.
- Vitu, F. & McConkie, G. W. (2000). Chapter 12 - Regressive Saccades and Word Perception in Adult Reading. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller & J. Pynte (Eds.), *Reading as a Perceptual Process*, 301-326. Oxford: North-Holland.
- Vitu, F. & McConkie, G. W. (2003). *Visuo-motor influences on eye movements in reading: How word position on line affects landing positions in words*. Paper presented at the ECEM12 (12th European Conference on Eye Movements), Dundee.
- Vitu, F., McConkie, G. W., Kerr, P. W. & O'Regan, J. K. (2001). Fixation location effects on fixation durations during reading: an inverted optimal viewing position effect. *Vision Research*, 41(25-26), 3513-3533.
- Vitu, F. & O'Regan, J. K. (1995). A challenge to current theories of eye movements in reading. . In J. M. Findlay, R. W. Kentridge & R. Walker (Eds.), *Eye movement research: Mechanisms, Processes and applications*. , 381-392. Amsterdam, Lausanne, NY, Oxford, Shannon, Tokio: Elsevier.
- Vitu, F. & O'Regan, J. K. (2004). Les mouvements oculaires comme indice "on-line" des processus cognitifs : rêve ou réalité ? In L. Ferrand & J. Grainger (Eds.), *Psycholinguistique cognitive: Essais en l'honneur de Juan Seguí*, 189-210: De Boeck Supérieur.
- Vitu, F., O'Regan, J. K. & Mittau, M. (1990). Optimal landing position in reading isolated words and continuous text. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 47(6), 583-600.
- Von Noorden, G. K. & Mackensen, G. (1962). Phenomenology of eccentric fixation. *American journal of ophthalmology*, 53, 642-660.
- Walker, R., Deubel, H., Schneider, W. X. & Findlay, J. M. (1997). Effect of Remote Distractors on Saccade Programming: Evidence for an Extended Fixation Zone. *Journal of Neurophysiology*, 78(2), 1108-1119.
- Webb, R. H., Hughes, G. W. & Delori, F. C. (1987). Confocal scanning laser ophthalmoscope. *Applied optics*, 26(8), 1492-1499.
- Wensveen, J. M., Bedell, H. E. & Loshin, D. S. (1995). Reading rates with artificial central scotomata with and without spatial remapping of print. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*, 72(2), 100-114.
- Wertheim, T. (1980). Peripheral visual acuity: Th. Wertheim. *American journal of optometry and physiological optics*, 57(12), 915-924.
- White, J. M. & Bedell, H. E. (1990). The oculomotor reference in humans with bilateral macular disease. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 31(6), 1149-1161.
- Whittaker, S. G., Budd, J. M. & Cummings, R. W. (1988). Eccentric fixation with macular scotoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 29, 268 - 278.
- Whittaker, S. G., Cummings, R. W. & Swieson, L. R. (1991). Saccade control without a fovea. *Vision research*, 31(12), 2209-2218.
- Wilson, H., Levi, D., Maffei, L., Rovamo, J. & DeValois, R. (1990). The perception of form: Retina to striate cortex. In L. Spillmann & J. Werner (Eds.), *Visual perception: The neurophysiological foundations*, 231-272. New York: Academic Press.
- Winterson, B. J. & Collewijn, H. (1976). Microsaccades during finely guided visuomotor tasks. *Vision research*, 16(12), 1387-1390.
- Wright, M. J. & Johnston, A. (1983). Spatiotemporal contrast sensitivity and visual field locus. *Vision research*, 23(10), 983-989.
- Wurtz, R. H. & Albano, J. E. (1980). Visual-motor function of the primate superior colliculus. *Annual Review of Neuroscience*, 3, 189-226.
- Yang, S.-n. (2006). An oculomotor-based model of eye movements in reading: The competition/interaction model. *Cognitive Systems Research*, 7(1), 56-69.
- Yang, S.-n. & McConkie, G. W. (2001). Eye movements during reading: a theory of saccade initiation times. *Vision research*, 41(25-26), 3567-3585.
- Yang, S.-n. & McConkie, G. W. (2004). Saccade generation during reading: Are words necessary? *The European Journal of Cognitive Psychology*, 16(1-2), 226-261.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A. & Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*: Springer.

ANNEXES

ANNEXE 1

LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

Article scientifique :

Yao-N'Dré, M., Castet, E. & Vitu, F. (2013). The Optimal Viewing Position effect in the lower visual field. *Vision research*, 76(0), 114-123.

Abstracts publiés :

Aguilar, C., Yao-N'Dré, M. & Castet, E. (2011). Improving reading speed with a gaze-contingent visual aid in the absence of macular vision. *Perception*, 40(ECVP Abstract Supplement), 195.

Yao-N'Dre, M., Castet, E. & Vitu, F. (2010). Are letters the correct unit to measure eye behaviour in reading? Testing the effect of character size on the launch site effect. *Journal of Vision*, 10(7), 529. (VSS)

Yao-N'Dré, M., Castet, E. & Vitu, F. (2011). Re-examining the effect of character size on eye movements during reading: Evidence for a modulation of the fixation-duration I-OVP effect. *Perception*, 40(ECVP Abstract Supplement), 194.

Conférences nationales et internationales (abstracts non publiés) :

Communication orale :

Yao-N'Dre, M., Castet, E. & Vitu, F. (2009). The influence of visual and oculo-motor factors in peripheral reading. (GDR Vision 2009, Toulouse)

Posters :

Yao-N'Dré, M., Vitu, F., M. & Castet, E. (2010). Role of fixation instability when reading continuous text with an artificial macular scotoma. (ARVO, Fort Lauderdale, FL)

Yao-N'Dre, M., Castet, E. & Vitu, F. (2011). Are letters the correct unit to measure eye behaviour in reading ? Testing the effect of character size on the launch site effect. (ECEM, Marseille).

Yao-N'Dré, M., Vitu, F., M. & Castet, E. (2009). Role of fixation instability when reading continuous text with an artificial macular scotoma (ECEM, Southampton, UK)



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Vision Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/visres

The Optimal Viewing Position effect in the lower visual field

Marina Yao-N'Dré, Eric Castet, Françoise Vitu*

Laboratoire de Psychologie Cognitive, CNRS, Aix-Marseille Université, Marseille, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 March 2012

Received in revised form 31 August 2012

Available online 15 November 2012

Keywords:

Optimal Viewing Position effect

Lower visual field

Word identification

Letter visibility

Peripheral reading

Preferred Retinal Locus

ABSTRACT

The Optimal Viewing Position (OVP) effect shows that word identification is best when the eyes first fixate near the centre of words. While this effect has been extensively studied in normal reading conditions, it has not been much investigated for words in the periphery. Here, we compared, in a perceptual identification task, the OVP effect for words presented either on the line of sight or in the lower visual field. Results confirmed the existence of an OVP effect for both central and vertically-shifted words but this effect was significantly weaker in the lower visual field. This finding provides further evidence for an important role of letter visibility in determining the shape of the OVP phenomenon. It also indicates that aligning the eyes with the centre of words is not as critical for vertically-shifted words. Implications for patients with central field loss who are forced to read in the periphery are discussed.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Due to the drastic decrease of visual acuity on either side of the central, foveal part of the retina and the interference from adjacent stimuli, or visual crowding (Bouma, 1970), visual performance deteriorates very rapidly from the centre of the fovea towards the periphery. In normally sighted readers, poor resolution in the periphery is compensated for by the execution every about 200–250 ms of very brief saccadic eye movements. Although there is great variability in the eyes' landing position, saccades most often bring the fovea near the centre of peripheral words or slightly left of it (i.e. the preferred viewing position; Rayner, 1979); this allows words to be processed optimally during the intervening eye-fixation periods (i.e. the Optimal Viewing Position or OVP effect; O'Regan et al., 1984). However, in patients with central field loss as in Age-related Macular Degeneration (AMD) or Stargardt's juvenile macular disease, word processing can no longer proceed in the fovea, and it relies instead on information extracted in various parts of the remaining intact peripheral field (or Preferred Retinal Locus, PRL). Interestingly, while the position of the PRL of patients is not predictive of their reading performance (Fletcher, Schuchard, & Watson, 1999), processing in the lower visual field seems to be more advantageous, at least after training (Fine & Rubin, 1999; Nilsson, 1990; Petre et al., 2000). This suggests that there might also be an optimal locus for peripheral words to be recognised most efficiently. To provide further insight on this issue, but also

in an attempt to better understand the origin of the OVP phenomenon, the present study tested whether words presented in the lower visual field benefit, just as foveal words, from being horizontally centred on the retina.

The OVP effect, investigated in a number of studies, tells how the initial horizontal placement of the eyes in a word constrains its identification and the subsequent eye movement pattern (for reviews see Brysbaert & Nazir, 2005; Rayner, 1998). Originally found during the reading of isolated words presented at variable horizontal locations relative to a previously displayed fixation point, and for limited vs. unlimited durations, the phenomenon was later found to generalise to natural reading, though being somewhat weaker (Vitu, O'Regan, & Mittau, 1990). The classical finding is that performance is best with the eyes near the centre of a word, or slightly left of it; the likelihood of correctly reporting a word is higher, and naming latency as well as lexical decision time are shorter when the eyes initially fixate near the centre of the word than when they start fixating the beginning or the end of the word. In a relative manner, the likelihood of refixating a word (i.e. of making an additional fixation on the word) is lower and the gaze duration (i.e. the total time the eyes remain on a word before moving to another word) is shorter when the eyes first fixate near the centre of the word than when they start fixating one of the word's ends.

The typical OVP curve is a U- or inverted-U shaped curve depending on the dependent variable; it is U-shaped for naming latency, lexical decision time, refixation probability and gaze duration, and inverted U-shaped when the probability of correct identification is measured. Irrespective of the dependent variable, the OVP curve has two main characteristics; the location of its minimum/maximum and its slope (i.e. how fast performance increases

* Corresponding author. Address: Laboratoire de Psychologie Cognitive, CNRS, Aix-Marseille University, Centre St. Charles, Bat 9, Case D, 3 Place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 03, France. Fax: +33 (0)4 13 55 09 95.

E-mail addresses: marinayaondre@gmail.com (M. Yao-N'Dré), francoise.vitu-thibault@univ-amu.fr (F. Vitu).

or decreases as the eyes fixate away from the optimal location). As revealed in isolated-word studies, the slope is relatively invariant. Reaction times (i.e. naming latency, lexical decision time and gaze duration) increase by about 20 ms per letter deviation from the optimal position. Reciprocally, when words are presented for a very short duration or for the time of a single fixation, the likelihood of correct identification, which is maximal near the centre of words drops by at least 10% per letter deviation from the optimal position (Nazir, O'Regan, & Jacobs, 1991; O'Regan, 1990; Stevens & Grainger, 2003). As reported by Brysbaert, Vitu, and Schroyens (1996), this also holds beyond the word boundaries that is even when words are displayed in the parafovea. The location of the minimum/maximum of the OVP curves is often slightly shifted to the left of the words' centre irrespective of their length. Still, the asymmetry of the curves tends to increase as words get longer which results in gradually steeper slopes for the right compared to the left half of the curves.

Different factors have been proposed to account for the shape and/or the asymmetry of the OVP effect observed in central vision: letter visibility, lexical constraints, reading habits and interhemispheric differences. These four factors are not necessarily mutually exclusive and may contribute jointly to word identification performance (for a review see Brysbaert & Nazir, 2005). The hypothesis that *letter visibility* plays a major role in the OVP effect is based on the drastic decrease of visual acuity, and reversely the strong increase of crowding when retinal eccentricity increases; given these, more letter information accumulates when the eyes' initial fixation falls near the centre of words. In accordance with this hypothesis, it has been shown that the bowl shape of the OVP effect, and possibly the asymmetry of the curves, can be captured by simply summing or multiplying the visibility from a given eye fixation location, of each of a word's individual letter. In a model first proposed by McConkie et al. (1989), letter visibility was derived from a linear visual acuity function which attributed an information value of 1 to the fixated letter, and an arbitrary drop-off rate of information of 0.1 for each additional letter deviation from fixation. This accurately predicted maximal word identification for fixations near the centre of words, but failed to reproduce the typical rightward bias of OVP curves. In a revised model, Nazir, O'Regan, and Jacobs (1991) proposed that the asymmetry of the effect arises from visual constraints specific to letter strings, thus suggesting that visual crowding, visual attentional processes and/or reading habits are also involved. In a letter discrimination task, they found in line with several other authors (Bouma, 1973; Legge & Bouma, 1977; Legge, Mansfield, & Chung, 2001 but see Stevens & Grainger, 2003), that the likelihood of correctly identifying a letter embedded in a string of homogeneous letters, decreases faster in the left compared to the right visual field. Based on these letter visibility scores, they successfully predicted typical OVP curves, with a steeper slope in the right compared to the left half of the words and a slight shift of the optimum of the curves to the left of the words' centre.

The hypothesis that *lexical factors* play a greater role in the OVP effect was proposed by Clark and O'Regan (1999). Their word identification model incorporates minimal letter visibility principles, but does not attribute the OVP effect to the amount of letter information which accumulates from various fixation locations. Rather, this is the level of lexical information carried by the set of extracted letters which is at the origin of the effect. If the centre of words is an optimal location for word identification, it is not because more letters can be extracted from this location, but it is because the extracted letters are shared by a smaller number of words in the lexicon (see also Stevens & Grainger, 2003). In their model, Clark and O'Regan (1999) computed a measure of lexical ambiguity for various theoretical fixation locations in words of variable length and frequency. Lexical ambiguity was defined as the number of words,

in the French or the English vocabulary, which were compatible with only four letters of a given word, the ones a priori extracted during a fixation irrespective of its location (i.e. the two letters at fixation, which benefit from being centred on the fovea and the two most extreme letters of the word, which are less subject to visual crowding). The curves representing lexical ambiguity as a function of fixation location predicted the empirical OVP curves quite accurately; they were U-shaped, with a minimum slightly to the left of the words' centre and a steeper slope for the right compared to the left part of the words. Several findings further corroborated the lexical hypothesis by revealing slight variations of the location of the optimum of OVP curves with the informativeness of the words' initial letter sequence (Holmes & O'Regan, 1987; see also Farid & Grainger, 1996).

As originally proposed by Nazir (2000), reading habits, and more precisely *perceptual learning* may also contribute to determine both the shape and the asymmetry of OVP curves (see also Mishkin & Forgays, 1952; Nazir et al., 2004). According to her hypothesis, the variations of word identification performance with retinal location would be a consequence of the preferred viewing position effect or the tendency, in languages read from left to right, for the eyes to land more frequently near the centre of words or slightly left of it (Rayner, 1979). Left-to-right adult readers would be better at identifying words within the central, or right-to-central part of their visual field because they would have been adapted to visualise words in that part of their visual field while learning to read. In line with this hypothesis, it was found that unknown visual patterns presented repeatedly in one given part of the visual field can be recognized only at the learned retinal location but not at others (e.g. Nazir & O'Regan, 1990 but see Chung, Legge, & Cheung, 2004). In addition, it was shown that the OVP effect does not generalise to pseudo-words (i.e. pronounceable, non-word, string of letters) and that the right visual field advantage, which remains greater for words than pseudo-words, and for letters compared to symbols, is specific to left-to-right readers (Grainger, Tydgate, & Isselé, 2010; Nazir et al., 2004). Still, there is no clear leftward asymmetry of the OVP effect in languages read from right to left (e.g., Arabic or Hebrew native readers; Farid & Grainger, 1996; Nazir et al., 2004) as would be predicted by the perceptual learning hypothesis. This may be due to *inter-hemispheric differences*, the fact that the left cerebral hemisphere generally plays a greater role in language processing (Brysbaert, 1994, 2004). Indeed, Brysbaert (1994) showed a significant effect of cerebral dominance on the OVP effect, with more symmetrical OVP curves for participants with right-hemisphere language dominance.

Although lexical constraints, perceptual learning and inter-hemispheric differences certainly contribute to the OVP effect, some findings suggest a predominant role of visual constraints. First, neither the slopes nor the location of the optimum of OVP curves varies with word frequency (O'Regan & Jacobs, 1992; see also O'Regan & Lévy-Schoen, 1987; Vitu et al., 2001), while some variations would be expected at least under lexical and possibly perceptual-learning hypotheses. On the other hand, in line with the visual hypothesis, it has been demonstrated that the shape of OVP curves varies with the visual characteristics of the stimuli. Nazir, Heller, and Sussmann (1992) varied inter-letter spacing and showed that the slopes of the curves became gradually greater as spacing, and hence the eccentricity (or the visibility) of each letter increased (decreased). Nazir, Jacobs, and O'Regan (1998) scaled letters in words proportionally to their distance to the fixation location, and found flatter OVP curves. However, the weakening of the effect was found only for short, 5-letter words, but not for longer words of 9 letters, thus violating the predictions of the visual model in that specific case. This finding can be reconciled with the visual account only if, as proposed by the authors, perceptual

learning also intervenes in word identification: compensating for letter visibility would remain inefficient as long as it would modify the usual shape of the words, and most exclusively the shape of long words. An alternative may simply be that lexical statistics intervene mainly in the case of long words, thus when the amount of letter information is relatively low (see Clark & O'Regan, 1999).

Whether the OVP effect generalises to words presented below the line of sight is, as we have seen above, a central question for reading in peripheral vision. It also provides a new and elegant way to further assess the contribution of low-level visual factors to the OVP phenomenon, but without changing the visual aspect of the words as in previous studies. Indeed, given the geometrical properties of visual acuity and crowding, the impact of the horizontal alignment of the eyes with the centre of words should be weaker (i.e. the slopes of OVP curves should be smaller) for vertically-shifted words compared to vertically-centred words. Fig. 1 shows why this might be the case; the 2-D retinal eccentricity of each letter of a word increases more slowly for words in the lower visual field compared to vertically-centred words (when character size is held constant). Since visual acuity decreases monotonously with the increase of retinal eccentricity (Wertheim, 1980), while crowding increases in proportion to 2-D eccentricity (Bouma, 1970; Pelli et al., 2007), the drop-off rate of word identification performance with the horizontal eye deviation from the word's centre should in turn be less drastic for words in the lower visual field.

To our knowledge, the OVP effect for vertically-shifted words was investigated in one study only, and the results revealed a stronger, but not weaker OVP effect with increasing vertical eccentricity (0–8°; Battista & Kalloniatis, 2002). However, these findings cannot be taken as a strong case against the above predictions. Indeed, identification performance was on average very high, near 100% correct in some conditions. Since test words were very short (4 letters), presented for rather long durations (90–100 ms) in both central and peripheral vision, and not scaled according to their vertical eccentricity, it is quite likely that ceiling effects modified the exact shape of the OVP curves as words were presented closer to the horizontal meridian (see Brysbaert, Vitu, & Schroyens, 1996). Here, to the contrary, we tested the OVP effect in longer (5- and 7-letter) words that were presented either on the horizontal meridian or at an eccentricity of 3° below fixation, while participants' eye fixation location was controlled online. In addition, as further detailed below, the presentation time of the words in the

two vertical presentation conditions was different in order to equate overall performance, and hence to reduce the likelihood of floor or ceiling effects.

It was previously shown that stimulus presentation time affects the likelihood of word identification, but has no effect on the general shape of the OVP curves, at least as long as there are no floor or ceiling effects (Brysbaert, Vitu, & Schroyens, 1996). Thus, to compensate for the difficulty of the task in peripheral vision, we used two different presentation durations for the two vertical presentation conditions, while holding character size constant. This was preferred to scaling letters according to their vertical eccentricity (e.g. Legge, Mansfield, & Chung, 2001) as the effect of character size on the OVP effect remains undetermined. After a preliminary experiment (see Section 2.3), presentation durations of 34 ms and 148 ms were selected for the vertically-centred and the vertically-shifted conditions respectively.

2. Methods

2.1. Participants

Nine individuals volunteered to participate in the experiment, for a remuneration of 30 €. They were all students of Aix-Marseille University and were between 18 and 25 years old. Participants were native French speakers and had normal uncorrected vision. They were all naïve with respect to the purpose of the experiment.

2.2. Materials

A total of 720 target words of 5 and 7 letters were selected for the experiment. They were nouns, adjectives in the singular form, adverbs, or verbs in the infinitive form or in the past tense. Their printed frequency of occurrence in the language was estimated from the 'Lexique 3' database (www.lexique.org; see New et al., 2001). Mean word frequency (μ) was 96 occurrences per million (with a standard deviation, σ , of 270) for 5-letter words and 40 occurrences per million ($\sigma = 270$) for 7-letter words. For each length, half the words had a low frequency (less than 15 occurrences per million for 5-letter words with $\mu_{51} = 3.7$ and $\sigma_{51} = 2.8$, and less than 10 occurrences per million for 7-letter words with $\mu_{71} = 2.51$, and $\sigma_{71} = 2.1$), and the other half had a high frequency (more than 20 occurrences per million for 5-letter words, with

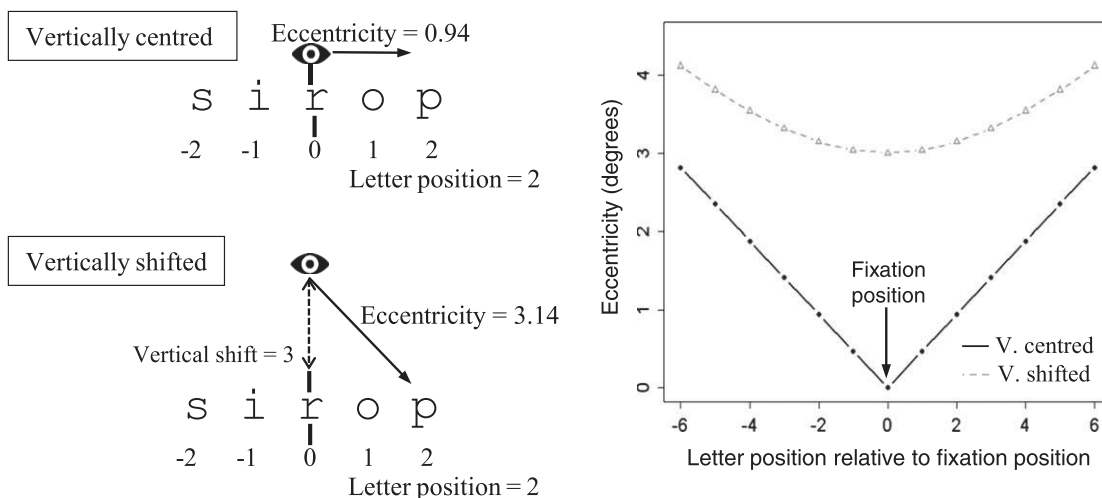


Fig. 1. Left panel: Relationship between horizontal letter position and 2D letter eccentricity of the "P" letter in the vertically-centred and the vertically-shifted conditions. Right panel: 2D letter eccentricity (in degrees) as a function of horizontal letter position relative to fixation position (in letters) for the vertically-centred (plain black) and the 3° vertically-shifted (dashed grey) conditions. Note the smaller overall range of eccentricity values in the vertically-shifted condition (from 3° to 4.12°) compared to the vertically-centred condition (from 0° to 2.82°).

$\mu_{51} = 189$, $\sigma_{51} = 360$ and more than 15 occurrences per million for 7-letter words, with $\mu_{71} = 78$, $\sigma_{71} = 94$).

The total set of selected words was rearranged into 10 lists that corresponded to the 10 blocks of trials following a Latin-square design (see Section 2.4). Each block was made of 76 words, 72 randomized, target words (18 of each category of length and frequency), and four practice words, always at the beginning of the block, to prepare the participant for the upcoming test trials. Two practice lists of 76 medium-frequency words were also presented before the first and the fifth block to train participants in each vertical-shift condition.

2.3. Procedure

An experimental session lasted about 4 h, breaks included (see below). Participants were seated in an adjustable chair in front of a computer screen; their head movements were restrained by use of a bite bar and forehead rest. They had at their disposal a response button to use during the calibration procedure and a keyboard to type the words/letters they had seen. Participants were asked not to move their head while typing their response on the keyboard and before doing so, they were asked to keep their eyes in the screen area and to move them down slowly towards the keyboard to avoid damaging the eye tracker.

Each block of trials was preceded by two phases, the set-up of the eye-tracker and a 15-dot calibration phase (see Vitu, Lancelin, & Marrier d'Unienville, 2007). The experimental blocks corresponded to the following sequence of events. First, the trial number was presented in the central, upper part of the screen during 800 ms. Then, two vertically-aligned bars appeared near the centre of the screen (on the vertical midline but slightly above the horizontal midline). Participants were asked to fixate the gap in between the two bars. The bars were presented for a minimal duration of 200 ms and until the computer detected a fixation within a small region around the bars (8 pixels, or 0.27° , on the horizontal axis and 30 pixels, or 1° on the vertical axis). Then, the bars were removed and the target word was displayed at the gap location in the centre condition, or 3° below in the vertical-shift condition for 34 and 148 ms respectively. This was followed by a mask of 19 hash marks, which covered all possible stimulus locations and hence did not preserve word length information. Word presentation times were chosen following a preliminary experiment, in which two participants were presented with 7-letter words that were always horizontally centred relative to the previously displayed fixation bars, but appeared at a vertical eccentricity of 0° or 3° and for variable durations. In order to balance the two conditions of vertical eccentricity, and also to prevent any floor or ceiling effect during the main experiment, we selected the presentation durations which yielded about 50% correct responses; these corresponded to 34 and 148 ms in the 0° and the 3° conditions respectively.

The mask remained on the screen until the participants pressed the keyboard return key. Participants were asked to press the return key as soon as they estimated having recognised the target word or not being able to recognise it. Then, they typed on the keyboard the word they had identified or all the letters they had seen at their respective position; in the latter case, they replaced missing letters by underscores “_”. Participants were requested to type the word in its correct orthographic form, with the accents and with no typos. Participants' response was displayed online in the central part of the screen (slightly above and left of the initial fixation point). Participants could erase typed letters at their ease, but after they pressed “enter” again, their response, which was erased from the screen, could no longer be modified. After a delay of 1 s, the next trial began. At the end of a block, the number of correctly identified words was displayed at the top of the screen.

Every participant was presented with two practice blocks and 10 test blocks (five in the centre condition and five in the vertical-shift condition). The two conditions were run in a fixed order, with the centre condition being always run first and the vertical-shift condition following. The latter was the most difficult condition and thus required more training than the former; it thus benefited from identifying briefly presented words in the horizontal condition (see Chung, Legge, & Cheung, 2004). In each block, the words were presented in a random order; this differed for each participant. Participants ran the experiment at their own pace, taking a break each time they wanted (but between blocks). This reduced the likelihood that fatigue interfered with their performances.

2.4. Design

In the experiment, there were four within-subject manipulations. The first was the horizontal shift (in number of letters) of the fixation bars relative to the centre of the test word (or initial fixation position), with nine levels, -4 , -3 , -2 , -1 , 0 , 1 , 2 , 3 , and 4 for 5-letter words and -6 , -4.5 , -3 , -1.5 , 0 , 1.5 , 3 , 4.5 and 6 for 7-letter words. Negative values indicated that the fixation position was to the left of word's centre, while positive values corresponded to fixations to the right of the word's centre. The selected range of fixation locations allowed comparison with prior reports of the OVP effect. The values for 5- and 7-letter words were different in order to have, for each word length, five fixation positions within the limits of the word and four fixation positions beyond the word boundaries (see examples in Fig. 2). The three other manipulated variables were the vertical shift of the word with two levels (0° and 3° from the midpoint between the initial fixation bars; see Fig. 2), word length with two levels (5 vs. 7 letters) and word frequency with two levels (high vs. low frequency). Each participant saw a total of 720 test words, that is 10 words of a given length and frequency in each presentation condition. A Latin-square design was used such that all participants saw each word only once, but all words were seen in every horizontal-shift condition across participants. As the number of participants was not high enough to perform a

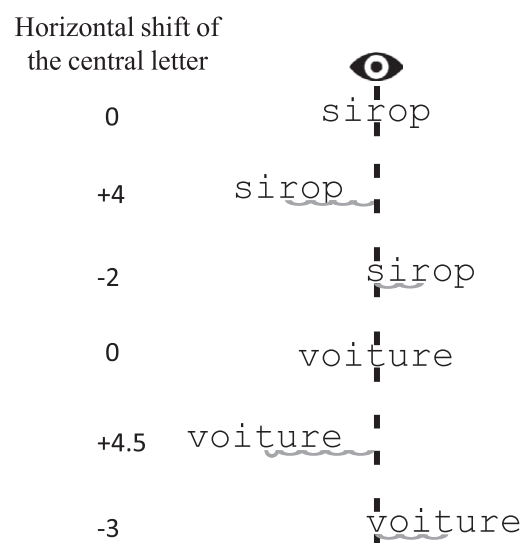


Fig. 2. Examples of three horizontal shift conditions for 5- and 7-letter words for the vertically centred condition. The two small vertical bars indicate fixation position. For negative values of horizontal shift (here -2 or -3), the fixation position is to the left of the word's centre. Note that the nine horizontal shift conditions were different for the 5- (-4 , -3 , -2 , -1 , 0 , 1 , 2 , 3 , and 4) and the 7-letter words (-6 , -4.5 , -3 , -1.5 , 0 , 1.5 , 3 , 4.5 and 6). These values of horizontal shift were the same across vertically-centred and vertically-shifted conditions.

complete Latin-square design, we chose not to counterbalance the stimuli between the two vertical presentation conditions, and hence between the blocks. This means that one given target word always appeared in the same block of trials, i.e. either in the vertically-centred (Blocks 1–5) or in the vertically-shifted condition (Blocks 6–10), but always at a different horizontal position across participants. The words were randomly assigned to the different conditions/blocks, but word frequency was matched in order to prevent any artefact related to lexical differences.

2.5. Apparatus

Eye movements were recorded using a Generation-V Dual-Purkinje-Image Eye Tracker (Ward Electro-Optics, Inc), sampling the right-eye position every millisecond with a spatial accuracy of 10 min of arc (Cornsweet & Crane, 1973). The eye tracker was interfaced with two IBM-compatible microcomputers. The first computer recorded button-press events and eye movements and analysed the eye-movement signal online, using the software developed by Van Rensbergen and De Troy (1993). The second computer controlled the visual presentation of the stimuli and stored the participants' responses for the word identification task. Eye movement parameters were continuously sent to the second computer, so that the visual display could be changed contingent on the position of the eyes. Stimuli were displayed in graphics mode on a 17 in. CRT monitor with 60 Hz refresh rate. Only lower-case letters, displayed in 'smallfont' with Turbo Pascal, were used and their size was the same in all conditions; each letter and character space subtended respectively 10 and 14 pixels corresponding to .33° and .47° of visual angle at a distance of 85 cm from the participants' eyes. Vision was binocular. The room was dark except for a dim indirect light source.

2.6. Data analysis

Before data analysis, the participants' responses were screened and eventually corrected to ensure that a correct response would not be classified as incorrect due to typos or orthographic errors classically made in writing French. Typing errors that were corrected included omission or substitution of an accent, and errors leading to the wrong word or a non-word, due to omission of a letter or addition/inversion of nearby letters on the keyboard. Ambiguous errors (e.g. addition or omission of an "r" at the end of a verb) were not corrected and hence left as incorrect responses. In all analyses, data were selected if (1) the word appeared during a fixation and not during a saccade, (2) participants did not make a saccade or press the keyboard before the mask was displayed, (3) there was no blink or any signal irregularity during this time frame. After this first selection, a total of 1235 trials were rejected (i.e. 21.8% of the full data set).

Since initial fixations within a certain region around the fixation bars triggered presentation of the target word, the eyes were often not exactly aligned with the midpoint between the bars. Thus, in the analyses, we used as an independent variable, not the horizontal shift of the word defined a priori relative to the fixation bars, but the actual horizontal deviation of the eyes expressed in number of character positions relative to the word's centre. In addition, we checked the true vertical position of the eyes when the word was presented; although we kept the categorical vertical-shift variable in the analyses, we selected for analysis only the trials in which the vertical eye position was less than 1.5 standard deviation from the mean across participants in the corresponding condition. Overall, the mean and standard deviation (in degrees of visual angle) of the distributions of the vertical eye position were $m_c = -0.012^\circ$ and $sd_c = 0.35$ for the vertically-centred condition, and $m_{vs} = 0.35^\circ$ and $sd_{vs} = .37$ for the vertically-shifted condition.

This second selection eliminated 517 more trials. Descriptive and statistical analyses were conducted on a final set of 3901 observations (i.e. 73% of the original set).

Statistical analyses and plots were performed using R Development Core Team (2008). Proportion of correct answers was analysed with a mixed-effects model (i.e. the variable "subject" was included as a random effect) using a logistic regression within the Generalised Linear Mixed Effect Model (GLMM) (NLME package in R, Pinheiro & Bates, 2000) (Bolker et al., 2009; Zuur et al., 2009). We entered in the model the absolute value of the horizontal shift, referred to as horizontal distance (from 0 to 6 letters), and the direction of the fixation position relative to the word centre (right vs. left side). Negative horizontal shifts corresponded to fixations to the left of the words' centre and positive horizontal shifts to fixations to the right of the words' centre. We also included as independent factors, vertical shift (0° vs. 3°), word length (5 vs. 7 characters), word frequency (low vs. high) and block number (as a continuous variable, from 1 to 10). We included interactions between horizontal distance and each of the four following factors: fixation side, vertical shift, word frequency, and block number, and also an interaction between vertical shift and block number.

3. Results

Descriptive results are presented in Fig. 3. The probability of correct word identification is plotted with a locally-weighted least squares approximation (LOWESS). This probability is represented as a function of the horizontal fixation position in number of letters for the 0° and 3° vertical shift conditions (plain and dashed curves respectively), and separately for 5- and 7-letter words (left and right panels respectively). This figure shows bowl-shaped curves, typical of the OVP effect, with best accuracy for fixations slightly left of the centre of 5-letter words (peak at -0.85 and -0.87 letter respectively for the vertically-centred and the vertically-shifted condition), and a bit more to the left of the centre of 7-letter words (peak at -1.14 and -1.42 letter respectively for the vertically-centred and the vertically-shifted condition). Importantly, the slopes of the curves appear to vary with the vertical presentation condition, an effect that cannot be due to ceiling or floor effects since the overall level of performance was in the same range for the two vertical conditions (respective mean probabilities of correct answer were 0.37 and 0.36 for the 0°- and the 3° vertical shift conditions). The slopes tend to be slightly steeper in the 0°- compared to the 3° vertical shift condition for both 5- and 7-letter words.

Results of the GLMM analysis are presented in Table 1 and plotted in Fig. 4. Logistic models use the logit transformation (i.e. $y = \log(p/(1-p))$) to fit the probability distribution of binary data (correct vs. incorrect answers). Thus, estimates and standard deviations of the fixed effects coefficients are expressed in logit units and can be back transformed into probabilities using the inverse logit formula ($p = 1/(1 + \exp^{-y})$). The values presented in the first column of Table 1 are the estimates of the fixed effects coefficients in logit units. The intercept estimate (logit = -0.204) corresponds to the performance when the continuous factors "horizontal distance" and "block number" as well as the categorical factors are at their reference value (i.e. vertical position = 0°, fixation side = left, word length = 5 and word frequency = low). The last column gives the predicted probability of correct word recognition for the intercept and for the non-reference levels of each categorical factor. These five values correspond to the intercepts of the curves plotted in Fig. 4. Recognition probability at reference level is obtained by applying the inverse logit formula to the intercept estimate ($1/(1 + \exp^{-(-0.204)}) = 0.449$, cf. Fig. 4, solid black line when the abscissa = 0). Probability corresponding to the non-reference level of a categorical factor is obtained by adding its estimated value to the intercept value (in logits), and then

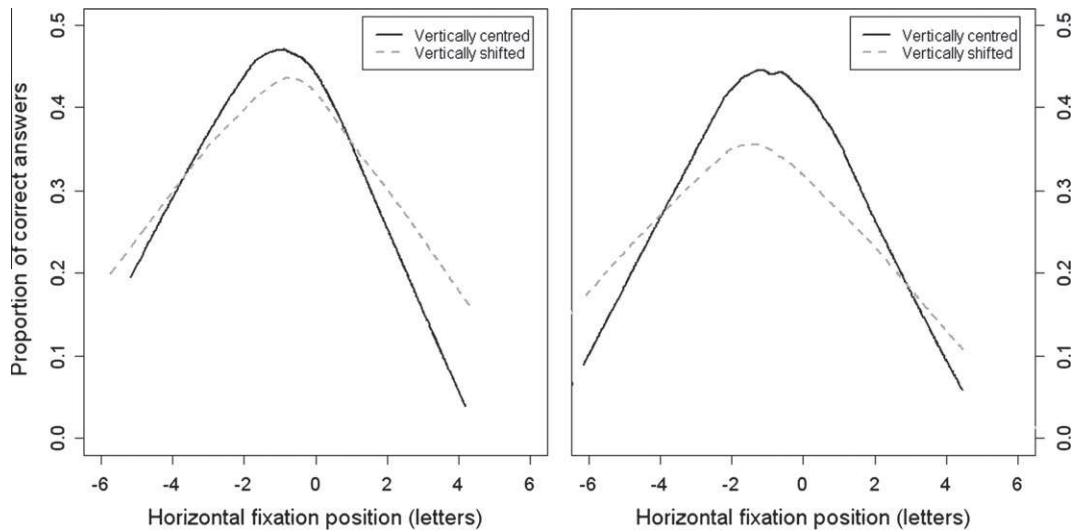


Fig. 3. Descriptive results: Proportion of correct word identification for vertically-centred (plain black line) and vertically-shifted words (dashed grey line) obtained with a lowess smoothing function, separately for 5- (left panel) and 7-letter words (right panel). The abscissa represents horizontal fixation position with respect to the word's centre.

Table 1

Results for the fixed effects obtained with a Generalised Linear Mixed Effects Model of the probability of correct word recognition. Estimates and standard deviations are given in logit units and can be back transformed to obtain the corresponding ratio (see text). The last column gives the predicted ratio for the different levels of the categorical predictors. The intercept represents the predicted proportion of correct answers when all the predictors are at their reference value (horizontal distance = 0, block number = 0, vertical shift = 0°, fixation side = left, word length = 5 and word frequency = low). Interaction effects are represented by a colon.

	Estimate (logit units)	Std. error	z Value	P	Corresponding estimate (probability)
Intercept	-0.204	0.313	-0.654	0.513	0.449
Horizontal distance (in letters)	-0.427	0.076	-5.622	1.89E-08***	-
Fixation side (Right)	-0.355	0.155	-2.443	0.015*	0.364
Vertical shift (3°)	-0.991	0.432	-2.296	0.022*	0.232
Word frequency (High)	0.867	0.144	6.032	1.62E-09***	0.660
Block number (1–10)	0.151	0.056	2.684	0.007**	-
Word length (7)	-0.166	0.081	-2.053	0.040*	0.408
H. distance : F. side (Right)	-0.247	0.055	-4.489	7.15E-06***	-
H. distance : V. shift (3°)	0.260	0.103	2.528	0.011*	-
H. distance : W. frequency (High)	0.015	0.052	0.295	0.768	-
H. distance : B. number	-0.010	0.018	-0.549	0.583	-
V. shift (3°) : B. number	-0.031	0.055	-0.558	0.577	-

* $P < 0.05$.

** $P < 0.01$.

*** $P < 0.001$.

back transforming the result with the inverse logit formula. For example, predicted recognition probability for vertically-shifted words (when other factors are at reference value) is $p = 1 / (1 + \exp^{-(-0.204 - 0.991)}) = 0.232$. The model shows a significant effect of all categorical factors. It predicts better overall performance for the vertically-centred ($p = 0.449$) than for the vertically-shifted words ($p = 0.232$, cf. Fig. 4, solid grey line, abscissa = 0). It also predicts better performance for 5- compared to 7-letter words ($p = 0.408$), and when subjects are fixating to the left rather than to the right ($p = 0.364$) of the word centre. The model also predicts a lower probability of correct answers for low- compared to high-frequency words ($p = 0.660$). The estimate of a continuous factor represents the slope of the linear relationship (in logit units) between the dependent variable and the predictor (NB in Table 1, the estimates corresponding to continuous factors were not back transformed in probability as the curves are not linear when the dependent variable is expressed as a probability).

Here, the estimate of the effect of horizontal distance was significantly negative (logit = -0.427), meaning that the probability of correct identification decreased exponentially when horizontal

distance increased. Inversely, block number had a significant positive effect (logit = 0.151), meaning that the probability of correct word identification increased over the experiment. We found a significant interaction between horizontal distance and vertical position, indicating that the effect of horizontal distance was stronger in the 0- (logit = -0.427) than in the 3° vertical condition (logit = -0.427 + 0.260 = -0.167). The negative estimate of the interaction between horizontal distance and fixation side showed that the effect of horizontal distance was stronger when the eyes fixated to the right (logit = -0.427 - 0.247 = -0.674) than to the left (logit = -0.427) of the word centre. This latter result confirms the left/right asymmetry tendency of the OVP curve with an advantage of the right visual field (fixation to the left of the word's centre) over the left one. Block number showed no significant interaction, neither with horizontal distance nor with vertical shift, meaning that even if recognition improved over the time course of the experiment, learning did not influence the shape of the OVP curve in either of the two conditions of vertical shift. Finally, we found no significant interaction between horizontal distance and word fre-

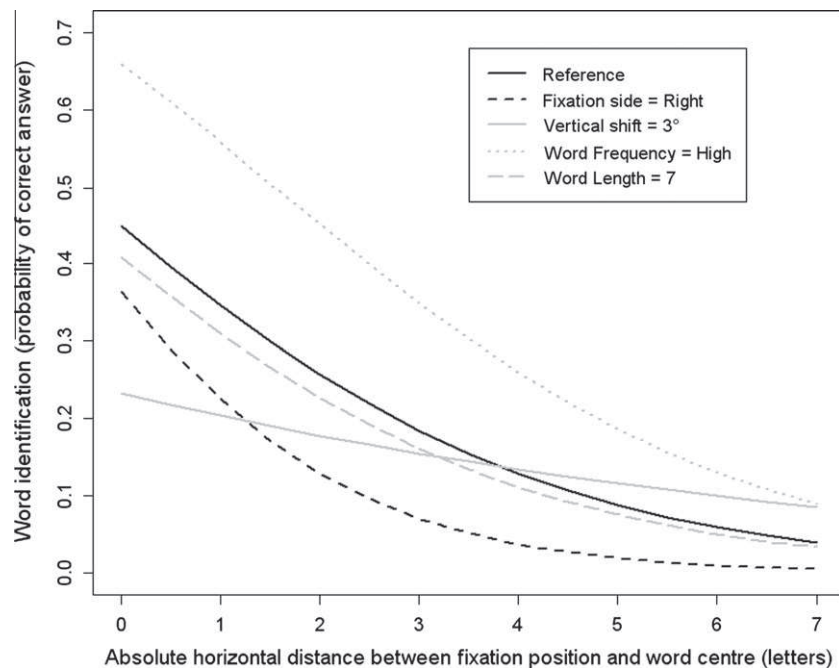


Fig. 4. Plot of the proportion of correct word identification as a function of horizontal distance predicted by the GLMM model. The plain black curve represents the effect of horizontal distance when all four categorical factors are set at their reference level. The other curves represent the effect when one of the four categorical factors is changed (dotted grey for word frequency = high, dashed grey for word length = 7, dashed black for fixation side = right and plain grey for vertical shift = 3°).

quency meaning that the shape of the OVP effect was not affected by word frequency.

Fig. 4 plots the effects revealed by the above analysis in terms of probability of correct word identification as a function of horizontal distance; the effect of block number is not represented here. The black plain curve shows the effect of horizontal distance when all other factors were set at their reference level ('reference regression curve'). The other curves show the effect of horizontal distance when one of the four categorical factors was changed: vertical position = 3° (plain grey), fixation side = right (dashed black), word length = 7 (dashed grey), and word frequency = high (dotted grey). This figure highlights that the curve corresponding to a vertical position of 3° (plain grey) is less steep than the reference curve, thus showing that vertical shift does affect the shape of OVP curves.

4. Discussion

Previous investigations have shown that a word is most easily and most rapidly identified when the eyes first fixate slightly to the left of the centre of the word. Here we found that this OVP effect, which has been extensively studied in central vision (for a review see Brysbaert & Nazir, 2005), generalises to words in the lower visual field. The likelihood of identifying a word of 5 or 7 letters was maximal when the eyes were horizontally aligned with a position slightly to the left of the centre of the words, and then dropped in an inverted U-shaped manner as the initial fixation location shifted to the right, and to a lesser extent to the left of this optimal location. Yet, the effect was weaker for vertically-shifted words than for words that were centred on the fovea. To our knowledge, there had been only one previous report of an OVP effect in vertically-shifted words, and it was stronger, and not weaker than in central vision (Battista & Kalloniatis, 2002). However, the overall performance level was relatively high and ceiling effects likely reduced the slopes of OVP curves in the central, control condition. Our data were not contaminated by either ceiling or floor effects, thus arguing for a significant, though weaker OVP effect

for words presented in the lower visual field. In the following sections, we discuss this novel finding in normally-sighted viewers, showing how this unequivocally supports the visual account of the OVP effect, and what this may imply for reading with a macular scotoma.

4.1. The role of visual processes in shaping the OVP effect

Several factors have been proposed to account for the shape of OVP curves, but visual factors have been attributed a main role. One reason is the possibility to predict OVP curves simply by implementing the drop-off rate of visual acuity with retinal eccentricity (McConkie et al., 1989), as well as additional visual constraints (Nazir, O'Regan, & Jacobs, 1991). Another reason is the observation that the OVP effect varies with letter visibility. In a study by Nazir, Heller, and Sussmann (1992), the effect was found to become gradually stronger as inter-letter spacing, and hence letter eccentricity increased. In another study by Nazir, Jacobs, and O'Regan (1998), the OVP effect was found to cancel out when the letters of the word were scaled as a function of their eccentricity, and hence letter visibility was equated, at least in the case of short, 5-letter words, but not longer 9-letter words. Our data provided further evidence for the visual assumption for short, 5-letter words, as well as longer, 7-letter words, and without changing the shape of the words. They showed for all our participants and irrespective of the length and the frequency of the words, that the OVP effect was weaker when words were presented below the line of sight compared to when they were vertically centred. This pattern can be explained by the geometrical properties of visual acuity and/or crowding. Letter eccentricity (2D distance from fixation location) versus horizontal letter position has a much shallower slope for vertically-shifted compared to vertically-centred words (cf. Fig. 1). As a result, the decrease of letter visibility with horizontal letter position is less steep for words presented below the line of sight. Besides, when letters are flanked by other letters, they are less subject to crowding in the lower visual field than on the horizontal meridian since the ellipses that represent the critical

spacing for crowding are oriented toward the fixation point (Pelli et al., 2007).

One may argue that the weakening of the OVP effect in the lower visual field was unrelated to the geometry of visual acuity and/or crowding, and was simply the byproduct of vertically-shifted words benefiting, in our experiment, from longer visual exposure than vertically-centred words (148 vs. 34 ms). By using longer presentation times, we aimed at compensating for the overall reduced letter visibility of peripheral words, and in turn allowing peripheral and foveal words to be identified with comparable accuracies. However, this may have, as a counterpart, also reduced the OVP effect in the lower visual field as suggested by Legge, Mansfield, and Chung's (2001) finding of larger visual spans for longer presentation times. However, we think it is rather unlikely. In Brysbaert, Vitu, and Schroyens' (1996) study, the shape of the OVP effect as measured for vertically-centred words, remained unchanged for presentation times ranging between 28 and 84 ms (i.e. a 3-fold increase). It is therefore reasonable to assume that this holds for slightly longer durations, particularly in the absence of ceiling effects as in our experiment.

Although our results support the hypothesis that letter visibility plays a main role in determining the shape of the OVP effect, we do not exclude a possible contribution of other factors which have been shown to also influence the OVP effect. However, we think these were not responsible for the weakening of the OVP effect in the lower visual field. Nazir (2000) proposed the assumption that perceptual learning contributes to determine the slope as well as the asymmetry of OVP curves in central vision (Mishkin & Forgays, 1952; Nazir et al., 2004). However, this would predict no OVP effect at all for vertically-shifted words. Indeed, normal reading proceeds preferentially along the line of text being fixated, but not the line(s) below (Pollatsek et al., 1993), and word recognition in the lower part of the visual field is certainly not as trained as foveal word identification. Moreover, as we have seen, block number interacted neither with horizontal distance nor with vertical shift. This indicates that the general improvement of identification performance we observed over the time course of the experiment was not specific to one particular vertical-presentation condition and did not impact on the strength of the OVP effect. Thus, perceptual learning was an unlikely factor responsible for the weakening of the OVP effect in the lower visual field.

On the other hand, Clark and O'Regan (1999) showed that lexical factors can on their own account for the OVP effect in vertically-centred words. They measured the number of words in the lexicon which share a set of four letters, those which are minimally extracted from a word (the two letters horizontally aligned with fixation and the two extreme letters of the word). They found that lexical ambiguity measured as such, varies in a U-shape manner with initial fixation location, and proposed on that basis that it is not the number of letters identified from a given fixation location, but rather the lexical informativeness of these letters, which shapes the OVP effect. The finding that the OVP effect was weaker when words were presented in the lower part of the visual field cannot be explained in the same terms. Indeed, if word identification relied only on lexical constraints and the identity of the extracted letters, but not the number of extracted letters nor their respective visibility levels, then the OVP effect should have remained unperturbed by the words' vertical offset. We must acknowledge that we did not control for the repartition of information within the words, and given that two different lists of words were attributed to vertically-centred and vertically-shifted presentation conditions respectively, the differences we observed could well be due to the lexical content of the stimuli. However, we think this is rather unlikely mainly because the variations of the OVP effect with vertical shift were independent of the block of trials and hence the set of words. Furthermore, care was taken that word fre-

quency was comparable between the two vertical presentation conditions. Note however that neither the overall increase of word identification performance with word frequency nor the lack of an effect on word frequency on the OVP effect (see also O'Regan & Jacobs, 1992; O'Regan & Lévy-Schoen, 1987) is consistent with a lexical hypothesis. Indeed, this would predict both a decrease of the OVP effect and overall better scores for less frequent words (see Clark & O'Regan, 1999). Thus, it seems unlikely that lexical factors are responsible for the weakening of the OVP curves in the lower visual field and for inducing the general shape of OVP curves. Rather, lexical factors may intervene on top of visual factors, which firstly determine how many letters are available from a given eye fixation location (see also Legge, Mansfield, & Chung, 2001; Stevens & Grainger, 2003).

4.2. Implications for reading in peripheral vision

When normally-sighted viewers read a text, they extract word information mainly in the foveal part of their retina. Some words may benefit from being previewed in the near periphery (see Rayner, 1998), but peripheral input mainly serves to guide the eyes over the lines of text. For patients with central field loss, however, reading can no longer proceed in the fovea, and must rely instead on the processing of peripheral word information. Poor resolution in the periphery as well as patients' fixation instability are correlated with severe reading impairments (Castet & Crossland, 2012; Crossland, Culham, & Rubin, 2004). Previous research has, among other things, attempted to determine whether there is an optimal placement of the eyes for peripheral words to be recognised most efficiently. The present findings provide further elements to this crucial issue.

Although previous studies have failed to reveal a significant correlation between the reading performance of patients and the location of their PRL (Crossland, Culham, & Rubin, 2005; Fletcher, Schuchard, & Watson, 1999), both empirical data and theoretical elaborations suggest that patients should more greatly benefit from placing their scotoma above or below rather than to the side of the target words (Bernard et al., 2008; Sunness et al., 1996). In several studies, word identification performance was found to improve when either patients or normally-sighted readers with an artificial scotoma were trained to use a vertical compared to a lateral PRL (Nilsson, Frennsson, & Nilsson, 2003; Petre et al., 2000). Furthermore, there are a number of reasons why reading in the lower visual field may be more favourable. One is simply that this prevents the scotoma from masking the remaining part of the line being read, which may be critical in terms of ongoing processing and eye guidance (Rayner, Well, & Pollatsek, 1980). Another reason, proposed by Petre et al. (2000) is related to the visual constraints that apply to letter extraction in the lower (or upper) as opposed to the lateral visual field. Fixating above rather than to the side of the target word reduces the eccentricity of the most eccentric letters of the word, especially when the gaze is horizontally aligned with the word's centre; it thus reduces the impact of the overall decrease of letter visibility in the periphery.

The present study provided another reason why a vertical (vs. lateral) PRL might be beneficial for AMD patients. By showing that the horizontal alignment of the eyes with the centre of words is not as crucial for vertically-shifted words compared to vertically-aligned words, this suggested that peripheral reading may present the additional advantage of reducing the need for accurate saccade programming. This is particularly critical since AMD patients experience difficulties in programming accurate saccades to specific target locations (White & Bedell, 1990; Whittaker, Cummings, & Swieson, 1991).

Although our study was limited to a vertical eccentricity of 3° (a relatively small distance compared to those observed in AMD pa-

tients), it is likely that our finding of a weaker OVP effect at 3° in the lower visual field generalises to other parts of the visual field, and may have in turn some implications for reading with a macular scotoma. From the visual basis of the OVP effect as well as the geometry of visual acuity and crowding (see Fig. 1), it is reasonable to expect that the weakening of the OVP effect we observed at an eccentricity of 3° would become even greater for words further away from the line of sight.

5. Conclusion

Words presented on the horizontal meridian are best recognised when the centre of the fovea is aligned with their centre, or a position slightly left of it. We have shown that this so-called Optimal Viewing Position effect generalises to words presented at a vertical eccentricity of 3° in the lower visual field, although it is weaker than in central vision. Thus, it remains important to keep the eyes horizontally aligned with the centre of words (or a position slightly left of it) while reading below the line of sight, but it is not as critical as in central vision. A parsimonious explanation relies on letter visibility: as letters move along the horizontal axis in the lower visual field, their distance to the fovea (2-D eccentricity), and hence their visibility decreases relatively less than when letters are along the horizontal meridian. While further supporting the hypothesis that the OVP effect shapes as a result of visual constraints, our results additionally suggest in line with previous data that patients with a central scotoma may more greatly benefit from a vertical (upper or lower) than a lateral PRL, while reading a text. This will be the work of future research to further investigate the implications of our findings for reading with a central scotoma.

Acknowledgments

We would like to thank Fermin Moscoso Del Prado Martin for his insightful comments and his help for data analysis, and Denis Drieghe and an anonymous reviewer for their helpful comments. Marina Yao-N'Dré was supported by a grant ("allocation de recherche") from the French Ministry of Research (2008–2011).

References

- Battista, J., & Kalloniatis, M. (2002). Left–right word recognition asymmetries in central and peripheral vision. *Vision Research*, 42(12), 1583–1592.
- Bernard, J. -B., Moscoso del Prado Martin, F., Montagnini, A., & Castet, E. (2008). A model of optimal oculomotor strategies in reading for normal and damaged visual fields. In L. Perrinet & E. Dacqué (Eds.), *Proceedings of the second French conference on computational neuroscience: Neurocomp 2008*. Marseille, France.
- Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H., et al. (2009). Generalized linear mixed models: A practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(3), 127–135.
- Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, 226(5241), 177–178.
- Bouma, H. (1973). Visual interference in the parafoveal recognition of initial and final letters of words. *Vision Research*, 13(4), 767–782.
- Brysaert, M. (1994). Interhemispheric transfer and the processing of foveally presented stimuli. *Behavioral Brain Research*, 64, 151–161.
- Brysaert, M. (2004). The importance of interhemispheric transfer for foveal vision: A factor that has been overlooked in theories of visual word recognition and object perception. *Brain and Language*, 88, 259–267.
- Brysaert, M., & Nazir, T. A. (2005). Visual constraints in written word recognition: Evidence from the optimal viewing-position effect. *Journal of Research in Reading*, 28(3), 216.
- Brysaert, M., Vitu, F., & Schroyens, W. (1996). The right field visual advantage and the optimal viewing position effect: On the relation between foveal and parafoveal word recognition. *Neuropsychologia*, 10(3), 385–395.
- Castet, E., & Crossland, M. D. (2012). Quantifying eye stability during a fixation task: A review of definitions and methods. *Seeing and Perceiving*, 25, 449–469.
- Chung, S. T. L., Legge, G. E., & Cheung, S. H. (2004). Letter-recognition and reading speed in peripheral vision benefit from perceptual learning. *Vision Research*, 44(7), 695–709.
- Clark, J. J., & O'Regan, J. K. (1999). Word ambiguity and the optimal viewing position in reading. *Vision Research*, 39(4), 843.
- Cornsweet, T. N., & Crane, H. D. (1973). Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth Purkinje images. *Journal of the Optical Society of America*, 63(8), 921–928.
- Crossland, M. D., Culham, L. E., & Rubin, G. S. (2004). Fixation stability and reading speed in patients with newly developed macular disease. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 24(4), 327–333.
- Crossland, M. D., Culham, L. E., & Rubin, G. S. (2005). Predicting reading fluency in patients with macular disease. *Optometry & Vision Science*, 82(1), 11–17.
- Farid, M., & Grainger, J. (1996). How initial fixation position influences visual word recognition: A comparison of French and Arabic. *Brain and Language*, 53(3), 351–368.
- Fine, E. M., & Rubin, G. S. (1999). Reading with simulated scotomas: Attending to the right is better than attending to the left. *Vision Research*, 39(5), 1039–1048.
- Fletcher, D. C., Schuchard, R. A., & Watson, G. (1999). Relative locations of macular scotomas near the PRL: Effect on low vision reading. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 36(4), 356–364.
- Grainger, J., Tydgate, I., & Isselé, J. (2010). Crowding affects letters and symbols differently. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(3), 673–688.
- Holmes, V. M., & O'Regan, J. K. (1987). Decomposing French words. In J. K. O'Regan & A. Lévy-Schoen (Eds.), *Eye movements: From physiology to cognition*. Amsterdam: North Holland.
- Legein, C. H., & Bouma, H. (1977). Dyslectic and normally-reading children. I. Exploration of a letter-search test for screening purposes. II. Follow-up and further exploration in 4 weak and 4 normal readers on letter, word and number recognition. *Documenta Ophthalmologica*, 42(2), 391–396.
- Legge, G. E., Mansfield, J. S., & Chung, S. T. L. (2001). Psychophysics of reading: XX. Linking letter recognition to reading speed in central and peripheral vision. *Vision Research*, 41(6), 725–743.
- McConkie, G. W., Kerr, P. W., Reddix, M. D., Zola, D., & Jacobs, A. M. (1989). Eye movement control during reading: II. Frequency of refixating a word. *Vision Research*, 46(3), 245–253.
- Mishkin, M., & Forgays, G. (1952). Word recognition as a function of retinal locus. *Journal of Experimental Psychology*, 43, 43–48.
- Nazir, T. A., Ben-Boutayab, N., Decoppet, N., Deutsch, A., & Frost, R. (2004). Reading habits, perceptual learning, and recognition of printed words. *Brain and Language*, 88(3), 294–311.
- Nazir, T. A., Heller, D., & Sussmann, C. (1992). Letter visibility and word recognition: The optimal viewing position in printed words. *Perception & Psychophysics*, 52(3), 315–328.
- Nazir, T. A., Jacobs, A. M., & O'Regan, J. K. (1998). Letter legibility and visual word recognition. *Memory & Cognition*, 26(4), 810–821.
- Nazir, T. A. (2000). Traces of print along the visual pathway. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller, & D. Pynte (Eds.), *Reading as a perceptual process* (pp. 3–22). Oxford: Elsevier.
- Nazir, T. A., & O'Regan, J. K. (1990). Some results on translation invariance in the human visual system. *Spatial Vision*, 5(2), 81–100.
- Nazir, T. A., O'Regan, J. K., & Jacobs, A. M. (1991). On words and their letters. *Bulletin of Psychonomic Society*, 29(2), 171–174.
- 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.
- Nilsson, U. L. (1990). Visual rehabilitation with and without educational training in the use of optical aids and residual vision. A prospective study of patients with advanced age-related macular degeneration. *Clinical Vision Sciences*, 6, 3–11.
- Nilsson, U. L., Frennsson, C., & Nilsson, S. E. G. (2003). Patients with AMD and a large absolute central scotoma can be trained successfully to use eccentric viewing, as demonstrated in a scanning laser ophthalmoscope. *Vision Research*, 43(16), 1777–1787.
- O'Regan, J. K. (1990). Eye movements and reading. *Reviews of Oculomotor Research*, 4, 395–453.
- O'Regan, J. K., & Jacobs, A. M. (1992). Optimal viewing position effect in word recognition: A challenge to current theory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(1), 185–197.
- O'Regan, J. K., & Lévy-Schoen, A. (1987). Eye movement strategy and tactics in word recognition and reading. In M. Coltheart (Ed.), *Attention and performance XII: The psychology of reading* (pp. 363–383). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- O'Regan, J. K., Lévy-Schoen, A., Pynte, J., & Brugallere, B. (1984). Convenient fixation location within isolated words of different length and structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10(2), 250–257.
- Pelli, D. G., Tillman, K. A., Freeman, J., Su, M., Berger, T. D., & Majaj, N. J. (2007). Crowding and eccentricity determine reading rate. *Journal of Vision*, 7(2).
- Petre, K. L., Hazel, C. A., Fine, E. M., & Rubin, G. S. (2000). Reading with eccentric fixation is faster in inferior visual field than in left visual field. *Optometry & Vision Science*, 77(1), 34–39.
- Pinheiro, J. C., & Bates, D. M. (2000). *Mixed-effects models in S and S-plus*. New York: Springer.
- Pollatsek, A., Raney, G. E., Lagasse, L., & Rayner, K. (1993). The use of information below fixation in reading and in visual search. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 47(2), 179–200.
- R Development Core Team, 2008. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rayner, K. (1979). Eye guidance in reading: Fixation location within words. *Perception*, 8, 21–30.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422.

- Rayner, K., Well, A., & Pollatsek, A. (1980). Asymmetry of the effective visual field in reading. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 27(6), 537–544.
- Stevens, M., & Grainger, J. (2003). Letter visibility and the viewing position effect in visual word recognition. *Perception & Psychophysics*, 65(1), 133–151.
- Sunness, J. S., Applegate, C. A., Haselwood, D., & Rubin, G. S. (1996). Fixation patterns and reading rates in eyes with central scotomas from advanced atrophic age-related macular degeneration and Stargardt disease. *Ophthalmology*, 103(9), 1458–1466.
- Van Rensbergen, J., & De Troy, A. (1993). *A reference guide for the Leuven dual-PC controlled Purkinje eyetracking system*. (Psych. Rep. No. 145). Leuven, Belgium: Laboratory of Experimental Psychology, University of Leuven.
- Vitu, F., Lancelin, D., & Marrier d'Unienville, V. (2007). A perceptual-economy account for the inverted-optimal viewing position effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(5), 1220–1249.
- Vitu, F., McConkie, G. W., Kerr, P. W., & O'Regan, J. K. (2001). Fixation location effects on fixation durations during reading: An inverted optimal viewing position effect. *Vision Research*, 41(25–26), 3513–3533.
- Vitu, F., O'Regan, J. K., & Mittau, M. (1990). Optimal landing position in reading isolated words and continuous text. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 47(6), 583–600.
- Wertheim, T. (1980). Peripheral visual acuity: Th. Wertheim. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 57(12), 915–924.
- White, J. M., & Bedell, H. E. (1990). The oculomotor reference in humans with bilateral macular disease. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 31(6), 1149–1161.
- Whittaker, S. G., Cummings, R. W., & Swieson, L. R. (1991). Saccade control without a fovea. *Vision Research*, 31(12), 2209–2218.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer.

ANNEXE 3

Liste des mots utilisés dans l'expérience 1 (Chapitre 5)

MOT	Fréquence		MOT	Fréquence		MOT	Fréquence	
dinar	N.C.	M	proposé	18.92	H	large	70.61	H
fluor	N.C.	M	idéal	11.28	B	tasse	25.07	H
calepin	N.C.	M	merle	2.64	B	caboter	0.07	B
potager	N.C.	M	pitié	57.91	H	clavier	3.24	B
alibi	5.47	B	suivi	48.04	H	pendant	450.41	H
tamis	1.82	B	mensuel	0.81	B	rupture	19.8	H
fruit	22.03	H	occulte	1.76	B	bahut	7.23	B
étage	69.19	H	honneur	87.64	H	exode	4.32	B
chamois	2.57	B	tronche	22.57	H	excès	22.23	H
moisson	4.05	B	gitan	1.89	B	voilà	329.26	H
semaine	111.96	H	groin	1.76	B	morbide	3.99	B
tableau	57.84	H	danse	29.19	H	sandale	0.74	B
patio	4.46	B	outré	23.18	H	affaire	150.54	H
purge	1.35	B	soutien	9.59	B	évident	20.14	H
forme	137.91	H	compact	3.24	B	tarte	8.31	B
point	272.64	H	violent	19.39	H	tueur	7.3	B
ignorer	0.54	B	élément	16.15	H	entre	834.26	H
coffret	5.81	B	jalon	1.08	B	oncle	121.96	H
disparu	58.78	H	bosse	6.82	B	corrida	3.65	B
prouver	21.15	H	nuque	48.51	H	forfait	3.38	B
avare	5.95	B	santé	52.43	H	remplir	22.5	H
fakir	0.88	B	paprika	0.61	B	contenu	16.42	H
lueur	49.12	H	osselet	0.14	B	stage	4.8	B
chant	28.38	H	voiture	221.22	H	jeton	4.32	B
abeille	3.18	B	ignorer	16.89	H	chute	35.27	H
semoule	1.35	B	thermal	0.54	B	force	218.38	H
montrer	81.15	H	passion	68.78	H	scorbut	0.95	B
trouble	18.31	H	récif	N.C.	M	tribune	6.96	B
butin	5.2	B	tiret	N.C.	M	certain	102.3	H
butor	0.88	B	formule	N.C.	M	méchant	16.01	H
éclat	50.95	H	blanche	N.C.	M	brame	3.24	B
quart	57.36	H	dense	9.86	B	venin	2.97	B
oranger	2.09	B	noyau	7.36	B	effet	173.18	H
macérer	0.54	B	soeur	116.55	H	somme	72.7	H
service	106.35	H	quand	1480.95	H	abonder	0.61	B
bouffer	15.68	H	beurrer	0.61	B	auréole	4.59	B
évier	11.42	B	cellier	2.97	B	couloir	80.47	H
agrès	1.01	B	couvert	17.16	H	effacer	18.31	H
appel	56.76	H	silence	313.38	H	benne	1.76	B
jeudi	21.01	H	proue	5.34	B	nonne	1.69	B
buvette	2.91	B	loyer	5.07	B	comte	51.42	H
virtuel	0.81	B	porte	537.09	H	perte	26.62	H
nouveau	138.38	H	villa	24.86	H	loterie	4.32	B
renoncé	17.3	H	métisse	0.34	B	positif	3.99	B
rafle	1.96	B	glucide	0.07	B	blouson	22.64	H
canif	4.32	B	trouver	192.7	H	confier	16.62	H
bande	52.36	H	mesurer	16.35	H	rival	4.8	B
usine	28.04	H	gazon	6.96	B	bulbe	1.01	B
stature	3.92	B	téton	0.47	B	cause	188.04	H

N.C. = Non contrôlée

poids	89.19	H	argot	4.46	B	journal	0.68	B
colombe	3.51	B	rébus	1.28	B	seconde	66.28	H
laminer	0.34	B	masse	60.54	H	inconnu	22.97	H
horizon	61.08	H	poète	23.45	H	email	5.74	B
éclater	19.59	H	dattier	0.68	B	cycle	4.05	B
tarot	N.C.	M	saturer	0.27	B	enfin	440.34	H
union	N.C.	M	soudain	207.3	H	grand	544.19	H
postue	N.C.	M	liquide	17.91	H	réchaud	6.22	B
cuisine	N.C.	M	tulle	3.31	B	cailler	0.68	B
meute	6.55	B	rejet	3.04	B	obscur	20.74	H
otite	0.47	B	coeur	380.2	H	parquet	18.51	H
aucun	181.01	H	tirer	99.73	H	cocon	2.91	B
place	438.18	H	aboyeur	0.34	B	pivot	1.55	B
radoter	0.41	B	bassine	6.55	B	fille	417.23	H
sevrage	1.01	B	dernier	146.69	H	parmi	171.96	H
pleurer	63.51	H	planète	19.86	H	tonique	1.55	B
royaume	18.78	H	sinus	1.01	B	notable	3.65	B
biche	7.36	B	filon	1.82	B	arriver	95	H
plant	1.62	B	cessé	61.22	H	allumer	20.81	H
flanc	29.53	H	siège	46.08	H	pépin	1.96	B
selon	110.88	H	maigrir	2.23	B	pince	0.34	B
lancier	0.14	B	nitrate	0.41	B	héros	43.72	H
risible	2.7	B	manteau	59.12	H	ouest	27.77	H
moindre	116.96	H	pénible	21.96	H	parasol	3.72	B
barbier	22.16	H	paréo	0.2	B	dilater	0.54	B
craie	10.27	B	godet	4.32	B	douceur	66.08	H
bidet	2.97	B	accès	23.78	H	exister	20.2	H
mille	142.09	H	petit	654.26	H	météo	1.69	B
terme	34.86	H	lacérer	1.01	B	pavot	1.15	B
zébrure	0.47	B	cratère	3.11	B	faute	81.15	H
brasier	5.81	B	rentrer	77.23	H	plein	157.91	H
heureux	125.41	H	secteur	18.45	H	carotte	2.97	B
baraque	22.84	H	encre	N.C.	M	timbale	1.76	B
tiers	13.85	B	navet	N.C.	M	courage	69.8	H
hampe	1.82	B	passage	N.C.	M	appuyer	16.49	H
garde	37.77	H	interne	N.C.	M	colis	1.54	B
voile	30.27	H	ébène	4.26	B	juron	3.31	B
blinder	0.34	B	ortie	0.74	B	série	35.41	H
péniche	5.27	B	chose	695.47	H	ombre	190.61	H
absence	72.5	H	crise	37.97	H	emprunt	3.78	B
défaite	19.46	H	gobelet	2.16	B	lamelle	0.54	B
hache	11.76	B	tatouer	0.81	B	présent	137.23	H
vodka	8.31	B	devenir	85.34	H	pension	18.18	H
repas	76.69	H	monstre	18.24	H	coran	2.43	B
trace	39.32	H	latte	2.03	B	rogne	2.23	B
unanime	4.66	B	scout	0.95	B	guère	110.68	H
costaud	5.27	B	libre	130.27	H	tapis	60.88	H
musique	109.86	H	toute	603.04	H	biberon	3.85	B
emporté	18.58	H	taverne	6.01	B	inavoué	0.81	B
souvent	286.96	H	queue	51.55	H	nylon	6.42	B
février	22.57	H	partage	8.04	B	ponte	1.62	B

chope	1.62	B	louange	1.82	B	chaud	46.42	H
tripe	1.42	B	laisser	192.03	H	adieu	27.5	H
après	821.82	H	reposer	20.95	H	inculte	1.49	B
neige	74.93	H	culot	6.76	B	immigré	0.2	B
poupre	4.73	B	nacre	5.2	B	plaisir	208.92	H
potiron	0.61	B	alors	1034.73	H	marcher	80.88	H
souffle	93.24	H	vieux	273.31	H	toque	6.55	B
méthode	16.42	H	hygiène	6.28	B	pitre	1.69	B
dorer	N.C.	M	offense	2.03	B	ligne	101.01	H
fuite	N.C.	M	comment	241.69	H	matin	376.89	H
peluche	N.C.	M	serrant	22.84	H	flamber	3.45	B
travail	N.C.	M	horde	3.78	B	ronde	1.62	B
pulpe	2.16	B	magot	3.51	B	tourner	68.78	H
samba	7.5	B	balle	44.86	H	falloir	17.77	H
moins	718.38	H	juger	28.65	H	tyran	4.59	B
voici	97.36	H	pupitre	5.74	B	dièse	0.34	B
filleul	1.22	B	trotter	2.64	B	amant	46.89	H
soutane	6.15	B	chapeau	72.91	H	récit	37.84	H
capable	69.8	H	grenier	19.53	H	rondeur	3.99	B
lumière	238.65	H	écrou	2.43	B	bigamie	0.47	B
momie	3.31	B	purin	2.23	B	ensuite	169.39	H
titan	0.68	B	droit	139.12	H	revenir	76.28	H
hiver	96.28	H	poing	47.97	H	tango	4.53	B
sorte	273.58	H	finesse	7.84	B	cumin	0.74	B
lunaire	3.78	B	noircir	2.16	B	ainsi	469.59	H
vicaire	2.23	B	couleur	118.65	H	plume	33.38	H
mousson	17.23	H	chinois	16.69	H	engrais	3.31	B
caresse	16.15	H	baffe	1.49	B	rongeur	1.01	B
bilan	6.22	B	cerne	1.42	B	portail	21.82	H
latin	4.46	B	mince	60.34	H	imposer	19.53	H
fumée	55.88	H	russe	35.34	H	micro	6.82	B
comme	3433.78	H	laideur	8.78	B	givre	5.07	B
monocle	3.92	B	inactif	0.34	B	toile	81.35	H
pintade	0.54	B	général	223.99	H	avant	574.66	H
surtout	291.62	H	ouvrant	18.65	H	pommeau	3.99	B
préféré	19.73	H	étang	N.C.	M	sulfate	0.47	B
harpe	4.86	B	débat	N.C.	M	pouvant	18.65	H
tempo	1.28	B	travers	N.C.	M	dessous	17.77	H
tante	110.95	H	premier	N.C.	M	cadet	3.42	B
aussi	1360.34	H	panse	2.91	B	magma	3.38	B
capital	6.96	B	valve	0.47	B	coupe	33.58	H
scalpel	0.88	B	agent	22.5	H	temps	1290	H
chambre	380.27	H	envie	252.09	H	mortier	3.51	B
conseil	58.18	H	romance	2.91	B	abribus	0.14	B
stand	2.64	B	romarin	1.01	B	presque	465.74	H
tonus	0.61	B	attente	61.35	H	engager	21.35	H
champ	53.51	H	sommeil	112.03	H	cible	8.38	B
ténor	2.03	B	mariage	70.68	H	vaste	55.61	H
allée	36.08	H	piscine	15.74	H	fugitif	3.65	B
sinon	89.39	H	sirop	7.64	B	nominal	0.14	B
tornade	3.18	B	recel	1.01	B	réalité	75.95	H

baliser	0.34	B	enfer	38.78	H	retirer	21.96	H
appeler	63.92	H	avoir	649.26	H	hamac	3.11	B
imaginé	18.38	H	fissure	4.66	B	jante	0.47	B
cacao	1.42	B	réfuter	0.81	B	herbe	86.15	H
lubie	1.35	B	exemple	119.19	H	vague	41.08	H
crier	47.3	H	univers	58.45	H	éleveur	1.01	B
pluie	111.76	H	chape	2.16	B	bandeau	4.73	B
couplet	3.51	B	lilas	5.47	B	quitter	85.95	H
joncher	0.07	B	chair	90.81	H	intense	20.27	H
cheveux	263.18	H	scène	95.27	H	dette	5.14	B
galerie	21.22	H	horaire	3.58	B	devis	1.62	B
corde	N.C.	M	molaire	0.74	B	terre	420.88	H
deuil	N.C.	M	compris	136.62	H	titre	53.04	H
pouvoir	N.C.	M	annonce	21.76	H	ouragan	3.72	B
chaleur	N.C.	M	javel	3.45	B	mutiler	0.81	B
belge	6.55	B	dégel	3.31	B	fatigue	65.81	H
stylo	10.61	B	frère	142.36	H	suivant	16.82	H
cadre	29.8	H	notre	681.08	H	atout	2.84	B
riche	42.57	H	entraîn	7.97	B	filin	1.42	B
fétiche	4.39	B	mamelle	1.01	B	désir	96.69	H
texture	1.69	B	médecin	60.68	H	grave	74.86	H
bonheur	156.42	H	section	16.35	H	adjoint	4.05	B
tromper	22.16	H	clope	2.5	B	trapèze	3.04	B
ravin	9.12	B	baril	2.03	B	haleine	21.82	H
rotin	3.38	B	laver	30.68	H	cortège	18.11	H
angle	46.89	H	venir	196.15	H	jabot	1.89	B
poser	73.85	H	radical	3.51	B	capot	7.23	B
édredon	5	B	abricot	1.15	B	écart	32.3	H
censure	3.04	B	oreille	103.51	H	table	341.35	H
parfois	287.36	H	diriger	17.64	H	jongler	1.82	B
affreux	22.23	H	jarre	1.49	B	veinule	0.07	B
digue	7.97	B	figue	1.35	B	glisser	61.62	H
ozone	0.54	B	blanc	152.03	H	vitrine	20.68	H
début	128.51	H	pouce	29.86	H	rumba	0.61	B
trait	37.91	H	carbone	1.62	B	pagne	1.42	B
toiture	5.95	B	lauréat	0.41	B	école	128.51	H
denture	1.96	B	acheter	57.23	H	plage	73.51	H
puisque	132.23	H	écarter	16.89	H	omnibus	1.28	B
répondu	60.14	H	kayak	N.C.	M	friture	3.24	B
poker	3.78	B	serum	N.C.	M	déserte	22.91	H
bouée	4.59	B	taulier	N.C.	M	central	20.74	H
juste	147.77	H	gondole	N.C.	M	raton	3.11	B
vertu	24.05	H	muret	2.64	B	flirt	2.64	B
candeur	4.46	B	tonte	0.74	B	court	39.86	H
névrose	1.28	B	jaune	75.81	H	monde	732.57	H
gorille	2.03	B	décor	38.78	H	patin	1.35	B
ablatif	0.14	B	froid	95	H	lasso	1.08	B
visiter	23.18	H	brigand	1.35	B	calme	65.81	H
établir	20.68	H	externe	0.54	B	faire	1555.27	H
radar	1.96	B	immense	83.99	H	brioche	4.66	B
lacet	5.27	B	soigner	17.64	H	cabaret	4.93	B

ANNEXE 4

Liste des mots utilisés dans l'expérience 3 (Chapitre 7)

Mot 1	Freq mot 1		Mot 2	Mot 3	Mot 4	Mot 5	Mot 6
ceux	30986	H	enterré	heure	fiscal	retraité	lin
raya	11,22	B	semelle	boîte	hindou	attribut	due
juge	44,46	H	plantée	avoir	mienne	comédien	dix
tain	1,55	B	harassé	glace	pipeau	virginie	par
muer	7,03	B	étalage	wagon	adopté	sonnerie	ait
gêna	7101	H	maladie	noyau	apache	aisselle	lus
cric	1,42	B	adjoint	table	cannée	sinistre	tel
clos	3128	H	hantise	opium	éhonté	lectrice	net
détail	91,15	H	galopin	eût	osmose	majorité	roy
preuve	65,34	H	machine	des	santal	enseigne	sut
oignon	15,54	B	console	pub	agrégé	montagne	lot
cadran	7,7	B	plainte	fit	serein	garantie	dés
ageot	7,36	B	argenté	dès	seyant	cheville	nia
orbite	8,31	B	ficelée	mur	annexe	matériel	sua
groupe	122,5	H	déchiré	âme	dératé	exigence	agi
figure	95,34	H	diadème	pop	doublé	chausson	mué
kilo	24,19	H	laveuse	froid	favori	portière	gerbe
fila	8851	H	fouille	pause	feutre	maréchal	fleur
sain	18,65	B	macabre	crâne	gauche	écrivain	idéal
bout	398,11	H	concile	débat	effort	inquiète	juste
mâle	15,95	B	laideur	ronce	tricot	milliard	geste
nuée	10,74	B	navrant	folle	machin	fillette	flûte
vrai	430,07	H	végétal	bribe	foudre	pareille	comte
mire	2,16	B	raideur	peine	éponge	rouquine	toile
client	81,55	H	relâché	tue	luette	bretelle	fusée
organe	15,68	B	abricot	lis	frange	douzaine	éloge
charge	41,28	H	anémone	mon	graine	pourquoi	roche
cagibi	5,34	B	chiffre	ôte	pascal	pommette	riche
morale	21,49	H	prompte	tôt	drogue	artifice	olive
caméra	6,35	B	enfance	oïl	farine	maternel	achat
copain	103,18	H	portier	sût	épuisé	cavalier	halte
orteil	9,12	B	pléiade	âge	griffe	jugement	flanc
laïc	0,88	B	logique	torse	pourri	accident	funèbre
moue	18,58	B	braille	génie	géante	passager	couette
guet	7,7	B	ralenti	brune	excuse	humanité	confite
vent	220,27	H	croyant	lieue	flaque	enceinte	massive
jupe	49,59	H	louange	vague	ironie	épidémie	critère
jade	3,51	B	poirier	délit	salade	mollesse	féconde
papa	77,16	H	friande	essor	cigare	moquerie	terreau
cela	74182	H	répandu	noyée	vierge	émeraude	mousson
palace	7,77	B	malfrat	mua	rendue	bouchère	isolement
cancer	9,46	B	monnaie	fut	ballon	académie	globule
église	145,07	H	suprême	use	géante	insomnie	respect
pâleur	10,41	B	fournie	tri	poumon	multiple	reprise
combat	72,57	H	violeur	ému	romain	béquille	société
canton	4,73	B	bouchon	tag	grotte	rarement	écorché
flaque	23,99	H	détente	mes	partie	bulletin	couffin
moment	688,24	H	potager	ail	commun	brouette	associé
tôle	15,41	B	coussin	grief	flotte	ceinture	ignominie
brun	68,18	H	relâche	valet	beurre	anecdote	placement
têtu	9,19	B	caresse	faute	bouche	audience	insolence
rage	45,34	H	insensé	lourd	profil	centaine	concombre
tenu	74122	H	affable	bombe	casque	veilleur	assistant
test	5,61	B	médusée	tabac	palier	carriole	organisme
irai	285493	H	cuvette	bille	accrue	sérénité	réflexion
insu	10,2	B	estival	verge	alpine	indigène	cuillerée
parade	11,22	B	imprévu	élu	pardon	tonnerre	laboureur
casino	10,81	B	brousse	une	coupée	chocolat	chevelure
casier	8,11	B	pension	plu	besoin	mansarde	monticule
voleur	22,7	H	pointue	paf	examen	beaucoup	équilibre
chérie	36,28	H	refrain	que	comble	luisante	politesse
entrée	118,78	H	barmaid	île	gaieté	constant	dictateur

pareil	16,96	B	trapèze	dût	poupée	feuille	paillette
nuance	20,81	H	aimante	pue	adulte	reproche	princesse
fief	3,45	B	jumelle	évier	granit	gaillard	réanimation
acte	57,3	H	chariot	album	sûreté	réfugiée	conjoncture
fané	7,57	B	manteau	nacre	espion	descente	aveuglement
suât	10,34	B	entrave	liane	frisée	mouillée	marécageuse
sûre	412,97	H	saillie	cerne	sommet	principe	échantillon
lame	37,09	H	sablier	blâme	montre	affreuse	grisonnante
fisc	1,28	B	soutenu	flash	chaque	prophète	machination
dois	131824	H	berceau	gomme	source	richesse	impératrice
patate	10,74	B	étourdi	sud	sienne	fourneau	provocateur
chalet	8,11	B	solaire	vit	sureau	paradoxe	scrupuleuse
alliée	55,34	H	barbier	aïe	bobard	épicerie	quarantaine
parent	146,35	H	émaillé	duo	câline	illustré	inconvenant
parler	9,05	B	capture	ode	ingénu	retraite	conseillère
cerise	10,07	B	suicide	fis	décidé	pourtant	fantaisiste
garage	24,12	H	perfide	axe	écoute	soudaine	abomination
plaque	46,15	H	spectre	der	fraise	fascisme	séminariste
lama	0,74	B	haltère	terme	évolué	asphalte	ces
lion	33,04	H	abdomen	bulle	fiable	chandail	lus
paon	5,34	B	décousu	galop	lésion	poitrail	ara
amie	354,12	H	respect	tigre	tunnel	patriote	fusil
envoyé	6,15	H	brochet	tua	direct	nauffrage	ouvreur
dollar	16,96	B	globule	coq	vapeur	disciple	méconnu
potage	6,22	H	bécasse	eux	bistro	honteuse	branchage
festin	5,68	B	dirigée	pou	accroc	aiguille	hospitalité
denrée	4,73	B	puceron	nez	fourni	agréable	cylindrique
fard	7,57	B	fresque	bière	piolet	puissant	dus
goût	141,82	H	correct	socle	irréel	désastre	col
étaï	0,88	B	clavier	parti	kabyle	carrière	lin
joie	150,2	H	mordoré	bonté	anorak	mercerie	ouf
voua	18,92	B	antenne	impôt	liante	punition	web
vont	285493	H	sucette	pique	stocké	mobilier	toc
étui	7,97	B	acharné	sourd	quitté	compteur	ôta
demi	43,51	H	doyenne	tweed	couvée	parisien	pré
change	9,8	B	dossier	eut	jeunot	employée	est
rocher	39,53	H	véranda	mot	crypte	lucidité	ces
paquet	89,19	H	syncope	aux	fabulé	chasseur	roc
pédale	12,23	B	refusée	ira	saturé	occasion	dix
chaude	19,05	B	célèbre	pet	choisi	tranchée	ais
muscle	34,53	H	écrasée	bon	bagout	moniteur	gis
peigne	10,81	B	tutelle	soi	frérot	sorcière	mou
aspect	41,28	H	esthète	ses	pylône	semblant	vil
loto	1,35	B	passion	pente	prônée	cendrier	saule
ring	4,66	B	visière	amour	minier	pochette	cèdre
rare	87,23	H	sourcil	mardi	dahlia	sanglant	gamin
rock	20	H	vigueur	urine	grillé	détresse	jambe
gril	1,76	B	concept	étage	phrasé	légitime	guise
lime	3,65	B	meneuse	gosse	phénol	activité	melon
dort	25905	H	indiqué	thèse	violet	ironique	autre
puis	272,77	H	chevelu	écart	muette	remorque	patin
pétale	8,24	B	atténué	nul	fédéré	mouchoir	rampe
soirée	76,69	H	arrivée	mil	festif	tracteur	fumée
membre	64,86	H	speaker	haï	gasoil	escouade	niche
gamine	38,78	H	gérante	rab	plasma	champion	magie
chaume	7,09	B	paresse	gît	ponant	propreté	dîner
chenal	4,73	B	asperge	cri	poster	fauteuil	titre
perron	18,24	B	forfait	zut	rustre	démarche	guide
gorgée	20,27	H	écuelle	bal	ajouté	amirauté	avant
paie	2,03	B	faiseur	cesse	exigée	noblesse	balafre
face	270,88	H	chaland	fusil	énervé	repentir	perçant
folk	2,64	B	défunte	store	campée	ornement	franche
jura	8176	H	méprise	bocal	paillé	aspirine	monture

vide	7081	H	ficelle	porte	pesage	habitude	barbare
lord	7,57	B	bouffée	perte	abbaye	éternité	éblouie
semi	1,28	B	farceur	rival	gourmé	grandeur	orifice
oeil	1234,59	H	soulier	doute	muguet	flambeau	capsule
bureau	150,07	H	gouffre	tir	tavelé	décharge	soierie
pétard	9,93	B	vermeil	rap	toscan	auditeur	croisée
chèque	9,86	B	entraîn	ici	avérée	profonde	agaçant
paysan	57,3	H	lunaire	top	cantal	cervelle	anodine
parfum	65,74	H	conseil	lié	crêpée	quantité	charité
piaule	12,16	B	dactylo	dur	égérie	douteuse	chômage
chérif	6,69	B	courage	tus	navale	maturité	brassée
course	81,22	H	enfouie	lie	priant	officiel	parleur
luge	1,55	B	artiste	gerbe	fuselé	centrale	employeur
mate	12,36	B	fumante	fleur	agrée	paisible	esplanade
gond	2,97	B	météore	idéal	privée	bataille	chirurgie
trop	790	H	ouvrier	juste	sombré	timidité	phosphore
rond	78,51	H	rustine	geste	empalé	empereur	renouveau
tels	3014	H	refoulé	flûte	rasage	pratique	véhémence
mité	1,01	B	côtière	comte	barman	policier	obsession
vite	351,89	H	rentrée	toile	corsée	guéridon	opération
bêtise	28,38	H	tombant	ion	mixeur	tournure	débandade
pignon	8,31	B	récital	fer	péroné	brassard	grisaille
raison	308,78	H	douleur	vin	radier	fabrique	technique
chimie	5,2	B	distant	las	sciage	assassin	résonance
légume	23,45	H	bastion	vif	sébacé	caissier	plaquette
pilier	16,15	B	bouffon	tes	gamète	chrétien	bulldozer
choeur	26,69	H	avenant	ban	native	vulgaire	capitaine
chevet	18,92	B	bruyant	gym	olympé	saucisse	plastique
lire	10,27	B	torride	fusée	plissé	nouvelle	déplacement
bord	228,11	H	dérobée	éloge	diluée	migraine	victorieuse
plus	5014,53	H	raciste	roche	chappe	héroïsme	emplacement
aval	3,99	B	ornière	riche	longée	prudence	réquisition
aide	55,54	H	arraché	olive	côtier	facilité	fallacieuse
mûre	19,73	B	cultivé	achat	ranger	nouvelle	incontinent
défi	17,36	B	rizière	halte	dérivé	efficace	aventureuse
tire	38324	H	ébauche	flanc	lapine	terrible	capitalisme
rumeur	37,97	H	parking	uns	votant	sonnette	hélicoptère
pilote	8,72	B	truquée	fui	agathe	clochard	clandestine
samedi	37,43	H	berline	zen	atrium	croyance	appellation
poésie	21,89	H	vitrine	mer	causal	aquarium	préhistoire
pilule	12,91	B	périple	sue	cérusé	cycliste	controverse
cierge	15,95	B	bouquet	géo	doseur	bouclier	chansonnier
régime	39,73	H	loukoum	bée	évitée	parfaite	souhaitable
ciment	18,85	B	musique	dit	fixage	attentif	remaniement
déluge	8,58	B	poussin	été	bédane	étreinte	sot
coucou	5,07	B	séchoir	fin	satané	cocktail	âgé
veau	16,96	H	pilleur	fouet	fendue	pression	colon
cochon	21,42	H	farfelu	tel	anémie	dernière	pacha
haie	26,08	H	ramassé	raton	gardée	émission	femelle
sept	0	B	bulldog	chair	rétive	intimité	buvable
flou	16,15	B	mélangé	boeuf	videur	munition	cantonade
gant	36,01	H	termite	crabe	ponton	porteuse	érudition
soja	0,61	B	crapaud	serpe	replié	virilité	postérieure
pari	12,57	B	colonel	nuque	rajout	curieuse	duc
képi	15,81	B	définie	fosse	grincé	festival	ris
ôter	42,03	H	cassant	orgue	ravage	province	nue
pneu	17,03	B	instant	rebut	rapiat	modestie	sol
bond	25,74	H	nervure	voûte	inondé	nerveuse	non
seul	915,27	H	rupture	corne	célieri	servante	vis
aéré	2,36	B	coincée	câble	ethnie	question	dix
ruai	2081	H	postale	sorte	napalm	faillite	ici
savoir	41,42	H	loterie	pan	aïeule	mortelle	jus

carton	44,86	H	enrouée	net	croupi	couronne	est
piquet	9,39	B	corrida	pis	séisme	apprenti	gré
façade	46,76	H	vicomte	pus	balayé	médaille	col
ciseau	13,85	B	message	cet	ébloui	héritier	due
pioche	6,42	B	allègre	ces	initié	sanction	sur
cintre	4,86	B	extrême	riz	rigide	cylindre	uni
chance	136,35	H	mentale	fie	figuré	figurant	par
mais	1,55	B	oreille	flair	avarié	prunelle	sucre
cher	133,65	H	litanie	brute	nichée	rivalité	duvet
murs	317,77	H	contigu	dépît	ramoné	commando	juive
orge	3,72	B	tremble	venue	annulé	mensonge	agent
quai	73,99	H	mensuel	lande	tâchée	délicate	voile
buts	274,32	H	lugubre	volet	drapée	jardinet	heurt
vexa	11,76	B	arrondi	appât	amoral	habileté	plein
stop	6,76	B	absolue	doigt	scalpé	querelle	engin
civile	13,99	B	troquet	bob	rétamé	pauvreté	reste
milieu	256,08	H	échappé	bât	grainé	peinture	corde
plâtre	15,81	B	glacier	tif	social	ambition	désir
dégoût	30,14	H	colonne	loi	noirci	identité	épice
projet	70	H	sultane	sou	meublé	muraille	butin
cercle	54,26	H	musette	bée	peigné	froidueur	règne
piqûre	10,95	B	bouilli	fou	modelé	coupable	harem
citron	10,81	B	mystère	tel	poivré	massacre	russe
mina	10,47	B	tonique	combe	rempli	parcelle	altesse
tapa	6791	H	sursaut	meule	karaté	religion	censeur
gîte	6,49	B	inquiet	voyou	titubé	illusion	initiée
plia	5020	H	esclave	vertu	feston	trahison	disparu
nuit	738,24	H	ineptie	salon	griffé	menaçant	criarde
indu	0,81	B	albâtre	marin	essaim	excessif	émaciée
thym	2,09	B	gamelle	gazon	chômée	revanche	pénible
roue	42,43	H	crachat	canal	rêveur	contrôle	étrange
prière	45,95	H	verbale	sac	poigne	scrupule	cuisine
claque	14,26	B	faïence	oui	douché	heureuse	déclaré
cliché	11,96	B	chignon	vue	peinte	vocation	fugitif
poivre	6,89	B	grisant	lus	texane	capacité	opacité
ventre	141,96	H	arrosée	peu	ranimé	triomphe	fougère
presse	41,82	H	frisson	ara	vrillé	élection	monocle
métier	84,53	H	frivole	ère	édenté	partisan	normale
poison	12,23	B	régence	alu	hélice	décision	cuisiot
aine	2,77	B	éternel	plage	hachée	paroisse	émisnaire
rose	96,08	H	fardeau	osier	cintré	ruisseau	privation
brin	19,26	B	épargne	souci	testée	sévérité	justicier
toit	91,76	H	sergent	barbe	induit	encolure	décadence
aveu	21,55	H	literie	sujet	tassée	déjeuner	subtilité
clan	16,42	B	abjecte	abord	octroi	cartable	chemisier
tari	1,82	B	prudent	appui	chipée	domicile	courtisan
ange	42,5	H	validée	bande	marche	bâtiment	continent
avenue	47,7	H	songeur	fil	écorné	lentille	manivelle
climat	18,99	B	godasse	qui	vivoté	cheminée	merveille
avocat	37,64	H	lecture	lit	coloré	aérienne	ministère
vérité	140,88	H	foraine	fût	gênant	parterre	précédent
cocher	5,27	B	syllabe	ait	attifé	paysanne	ressource
accent	45,54	H	chimère	mûr	moisie	apéritif	invention
porche	17,03	B	forcené	ras	deviné	pianiste	éclaireur
poteau	13,04	B	assoupi	ter	grêlée	uniforme	estafette
taie	2,57	B	serrure	orage	réparé	adhésion	cheminement
égal	39,32	H	épreuve	jeton	fourbu	rigolade	grossissant
doit	131824	H	produit	danse	élégie	sonorité	palefrenier
judo	1,22	B	préface	belle	soldée	submergé	capitaliste
crue	94723	H	enfumée	grève	fripon	ralentie	inexistence
boum	3,04	B	fourgon	tribu	avilie	batelier	patibulaire
faim	75,95	H	penseur	envol	centré	limousin	instinctive
usée	17,09	B	poinçon	marié	filant	friction	connaisseur

consul	10,07	B	humaine	eau	report	sainteté	perceptible
prince	101,22	H	instant	clé	macéré	sexuelle	acquisition
soleil	334,39	H	délicat	cil	flotté	algérien	aménagement
ennemi	111,96	H	enquête	nés	papoté	crevette	célibataire
préfet	8,45	B	cubique	cor	lignée	huissier	repoussante
cognac	11,01	B	routine	aie	maillé	altitude	adolescente
banque	30,88	H	costaud	eue	massue	attentat	inscription
poutre	15,74	B	créneau	sil	réelle	puanteur	inséparable
porc	14,46	H	inopiné	essai	effilé	maintien	ion
chèvre	20,61	H	déréglé	tes	infuse	marraine	mai
défilé	14,73	B	directe	rat	mûrier	mendiant	cas
daim	5,74	B	bottine	selle	grenat	actuelle	radio
carafe	5,47	B	pintade	car	biaisé	sécurité	effrayé
chaire	5,74	B	abeille	son	froncé	passante	frein
vase	32,97	H	faisane	volée	cancan	victoire	traversée
euro	0	B	divorcé	carpe	borgne	jalousie	pronostic
polo	2,03	B	dormeur	cygne	édifié	exploité	clapotement
peut	265980	H	bouille	galet	musclé	résineux	huit
plié	0,88	B	denture	soupe	pincée	accroche	mots
lune	66,69	H	devenir	messe	épandu	humanisé	pull
rhum	12,7	B	suranné	force	abattu	continue	coma
zone	42,5	H	rouille	égout	régule	mobilisé	maxi
apte	4,59	B	stupide	foule	fauché	anxieuse	broc
béni	18,92	B	largeur	lutte	brunie	abstruse	mêla
sale	102,03	H	désuète	ortie	dérapé	ruineuse	courbe
hanche	32,36	H	restant	suc	rejugé	pivotant	rabbin
convoi	18,78	B	auberge	foi	lactée	tamponné	compte
cordon	12,23	B	utilité	thé	avouée	marabout	raisin
proche	15,41	B	violacé	yen	targué	attristé	esprit
clarté	30,68	H	allongé	tek	vilain	figurine	crédit
prieur	8,85	B	plinthe	sec	baisée	sérielle	emploi
paille	44,05	H	embêtée	but	gluant	canonisé	crèche
oeuvre	92,23	H	imprévu	rot	incité	vermoulu	étai
naïf	21,62	H	cloître	micro	torero	succombé	dota
golf	7,3	B	peintre	moine	chétif	cohabité	chic
nuls	0,34	B	réduite	bahut	crêtée	gothique	près
fort	212,77	H	bancale	tango	nominé	regretté	jeux
orée	4,86	B	frasque	chère	isthme	cohérent	soin
noua	3250	H	épicier	proie	fétide	catcheur	sang
fait	355,54	H	centime	poing	futaie	ouvreuse	buée
tapi	1,42	B	amaigri	reine	adjuré	fugitive	rasoir
pureté	13,99	B	palette	pro	abouti	détourné	gueule
goutte	64,32	H	gratuit	ont	baissé	aptitude	gelée
sortie	75,27	H	opulent	met	bluffé	glaçante	gorge
couple	63,99	H	taulier	rît	déplié	concerné	petit
cornet	8,04	B	flingue	nid	espacé	engrangé	ligne
corvée	16,76	B	effacée	cap	grêlon	offrante	éveil
cirque	19,53	H	changée	sas	damnée	comparse	appel
propre	15,07	B	loyauté	gaz	essoré	articulé	fibre
cèpe	1,15	B	crottin	pêche	laquée	salaison	altesse
bref	38,78	H	osselet	issue	baladé	conversé	censeur
lors	70,27	H	soumise	queue	visité	alanguie	initiée
aire	5,14	B	tournée	fiche	baigné	reproché	disparu
rase	16,89	B	bagnard	cycle	péplum	déclassé	effrayé
soûl	2,77	B	séparée	pince	syrien	racoleur	criarde
leur	42750	H	carreau	marge	débine	sabotage	émaciée
sera	1508547	H	caporal	short	obligé	sabotier	pénible
visage	565	H	rainure	ton	happée	mutation	étrange
désert	41,89	H	tartine	pli	drogué	anormale	cuisine
coteau	7,7	B	prairie	ego	pioché	explosif	déclaré
patrie	29,19	H	finance	nom	refilé	embusqué	fugitif
pyjama	17,57	B	trépied	cas	suture	urinaire	opacité

puzzle	11,82	B	aiguisé	mec	psaume	glaciale	fougère
coulée	9,8	B	robuste	are	riveté	commenté	monocle
siècle	132,91	H	moussue	mue	tulipe	vocalise	normale
rang	58,24	H	épanoui	lance	manqué	sommaire	collégien
huit	10250	H	versant	crépi	mutilé	ankylosé	imminence
mots	553,78	H	charpie	étape	codage	cyclisme	blasphème
pull	8,65	B	préféré	moral	goujat	infamant	brodequin
coma	4,93	B	gabarit	angle	ébahie	pouponné	traversin
maxi	0,95	B	éprouvé	asile	tribun	importun	livraison
broc	4,53	B	malheur	grain	dévoyé	partiale	amoureuse
mêla	11264	H	concert	pluie	pollen	carrosse	clientèle
courbe	18,11	B	matière	bût	exhumé	incisive	règlement
rabbin	7,57	B	glaïeul	vît	bossue	débauché	vainqueur
compte	208,38	H	évident	lût	fessée	intestin	baignoire
raisin	9,53	B	poreuse	kit	torché	meringué	chandelle
esprit	216,28	H	lyrisme	vêt	litron	cohésion	vaisselle
crédit	20,27	H	ampoule	mas	flemme	décousue	cartouche
emploi	29,19	H	bivouac	hua	fagoté	déconfit	paillasse
crèche	9,39	B	meurtre	tic	arboré	veinarde	infirmité
étau	4,86	B	bâtarde	unité	active	idolâtre	lamentation
dota	8,99	B	délabré	quant	leveur	viscéral	transgressé
chic	14,32	B	caserne	pleur	filial	déraciné	persistance
près	156,96	H	babiole	golfe	baguée	brièveté	pernicieuse
jeux	173,31	H	sauvage	linge	acculé	comtoise	commandante
soin	68,24	H	douille	droit	friand	dompteur	escroquerie
sang	207,3	H	joueuse	globe	rétine	sécurisé	aiguillonné
buée	13,51	B	étoilée	colle	régent	flemmard	prélèvement
rasoir	21,28	B	arriéré	bic	salant	tommette	inclination
gueule	109,93	H	peinard	art	nageur	dispensé	sempiternel
délire	19,8	H	venelle	tin	loueur	frontale	frustration
bronze	19,26	H	gênante	bel	étalée	rabattue	lotissement
crique	5,2	B	étouffé	lut	raillé	cerisier	psychiatrie
rappel	10,34	B	praline	val	ramure	dévorant	probabilité
retour	158,65	H	probité	tut	émotif	desserte	étouffement
crétin	8,58	B	altesse	fax	affadi	recharge	pourrissant
saumon	4,73	B	liseuse	far	choppé	écumoire	fui
sole	2,5	B	crédule	genêt	gourou	consoeur	délai
bambou	6,15	H	perdrix	sut	radine	engendré	congé
taon	0,61	B	dégradé	canif	pavane	grelotté	cuisot
greffe	5,41	B	lombric	roy	plaint	épouillé	mélasse
sage	31,15	H	recteur	vison	muflée	réceptif	chalutier
grec	29,46	H	dauphin	natte	jujube	rigolote	supermarché
rata	0,27	B	monacal	taupe	bombée	dépeuplé	brancardier
yoga	1,08	B	atelier	cobra	vernier	beuglant	acrobatique
trac	8,38	B	déformé	pièce	agrume	calcaire	zut
film	74,12	H	fiancée	leçon	strate	attendri	eut
âtre	5,88	B	risible	bidon	râleur	roulante	aux
inné	2,97	B	cochère	prime	lymphe	fruitier	pus
lise	32480	H	traître	fauve	grippé	proverbe	fis
râpé	3,51	B	central	étude	curare	quenelle	mes
taxi	46,82	H	adoptif	plomb	cariée	tombante	lis
déjà	702,23	H	détenue	coude	bipède	bouffant	net
crosse	11,96	B	horaire	vie	afghan	grimpeur	nem
signal	23,11	H	incliné	ôta	export	comprise	dis
rayure	7,36	B	geindre	fit	refusé	indolore	rue
croisé	7,64	B	édifice	ais	grisée	tenaillé	nus
centre	84,46	H	dizaine	gis	relogé	embouché	épi
ration	8,18	B	tanière	mou	bottée	aspérité	ose
mesure	132,84	H	invitée	six	décelé	immortel	vus
flèche	25	H	arbitre	tas	passée	boudeuse	jet
turc	10,54	B	droguée	décor	cubain	aventuré	gelée
file	25,54	H	persane	butte	couard	tunisien	mêlée
oral	1,96	B	factice	somme	cordée	pointure	poire

pêne	0,81	B	libéral	noeud	aliéné	gymnaste	neveu
punk	4,12	B	actrice	outil	tourne	scélérat	basse
tour	308,72	H	mourant	civil	rallye	infidèle	noble
parc	43,99	H	rondeur	style	junior	thermale	étain
tout	3171,35	H	médecin	chêne	désuni	bénitier	carte
bagage	24,39	H	alertée	rué	farcie	respecté	congé
croûte	17,3	B	litière	tee	débile	mémorisé	tonne
audace	19,46	H	veillée	fun	cursif	fermenté	fibre
rebord	18,65	B	escrime	pua	évacué	calomnié	appel
croupe	14,05	B	servant	gui	couiné	fourreau	éveil
douche	23,85	H	majeure	bec	flouée	voracité	ligne
assaut	32,16	H	tempête	ouï	ébroué	dormante	petit
recoin	12,36	B	idiotie	toi	auquel	peuplade	gorge
puer	18,65	B	frousse	grêle	gallon	freinage	pistard
bâti	2,3	B	vendeur	ravin	étique	amovible	trinité
gain	5,88	B	matinée	samba	diseur	relative	enrobée
elle	699149	H	ambiguë	lueur	action	évanouie	sellier
noir	482,23	H	profane	trône	relaxe	vexation	ventilé
vaut	17574	H	orateur	plaie	pépite	passible	briseur
vice	18,45	B	filante	hache	lestée	arctique	aromate
tort	55	H	épaisse	fente	faraud	méridien	fusible
réduit	8,99	B	incisif	sua	envolé	baignade	décalée
déclic	7,97	B	plateau	chu	berlue	colloque	colique
prison	72,43	H	Crainte	bol	aspiré	clémente	papiste
déchet	6,42	B	joyeuse	don	sabrée	enchanté	modifié
lettre	256,01	H	employé	agi	hérité	destitué	missile
refuge	18,65	B	constat	bip	fêtard	aération	attablé
cendre	28,85	H	recueil	dot	savate	effondré	amuseur
cabane	29,46	H	précoce	lac	leurré	fourchue	lancier
ciel	305,2	H	pivoine	folie	amidon	carénage	enveloppe
liée	5,14	B	bagarre	total	abusée	solstice	miniature
dent	125,68	H	prenant	stock	traque	prothèse	idéologie
cinq	22061	H	passive	local	racket	coexisté	pansement
raid	2,84	B	stérile	rhume	quiche	intitulé	austérité
mile	1,28	B	boudeur	ennui	pétant	puritain	industrie
vrac	5,2	B	profane	botte	persan	asphyxié	entourage
erre	2736	H	facture	règle	jeunet	masculin	côtelette
relève	6,69	B	gourdin	cep	viaduc	méritant	supérieur
navire	50,2	H	géniale	boy	sidéré	onéreuse	étrangeté
relent	9,12	B	crochue	max	noceur	inscrite	charrette
auteur	41,89	H	rosette	béa	moulue	building	signature
brosse	19,59	H	navette	jeu	gésier	désirant	tolérance
déclin	6,42	B	divorce	dés	chipie	persuadé	guirlande
grange	46,01	H	étonnée	fit	chrono	épineuse	sensation
décret	9,12	B	inutile	nia	tondue	arrosage	gratitude
rive	46,15	H	pétrole	usage	craque	éclairci	insoupçonné
fous	55,81	H	appuyée	sirop	chlore	corrompu	rébarbative
watt	0,81	B	pourrie	vanne	butoir	fortuite	indigestion
mica	2,77	B	immense	hêtre	balèze	terrassé	intéressant
abri	56,76	H	vertige	trace	striée	douzième	correspondu
alla	285493	H	requête	maçon	mentor	débutant	rougissante
mêlé	6,01	B	couenne	meute	mental	penseuse	garçonnière
pige	14,39	B	heurtée	brume	galbée	sicilien	impermeable
statue	42,84	H	crémier	via	pédalo	enfrent	épouvantail
désesse	8,65	B	support	tût	origan	divinisé	échafaudage
revoir	36,01	H	enjouée	lot	minium	révision	promiscuité
gosier	4,93	B	humilié	ils	menuet	assailli	envahisseur
viande	45	H	autocar	nie	éthéré	chenapan	miraculeuse
remède	13,45	B	néfaste	pot	choral	croulant	dépositaire
demain	21,55	H	adresse	usa	cause	empreint	provocateur
dédain	10,07	B	fissure	dut	biseau	atypique	consécutive
onze	3885	H	fauchée	singe	dépose	baluchon	pré
raie	11,01	H	pontife	caste	brelan	goupille	rit

tortue	6,22	B	lorrain	hué	flairé	sérénade	salut
malt	0,14	B	grillon	belge	houppes	conscrit	désunie
dingue	7,57	B	cigogne	pif	excité	avenante	baccara
date	45,74	H	pieuvre	norme	confit	empoigné	hypothèse
pigeon	19,26	H	vivable	mus	asexué	communié	fécondité
logo	0	B	ferrure	furet	amputé	chaloupe	responsable
tipi	0	B	crânien	guêpe	nectar	mollette	inspirateur
très	1120.81	H	chapeau	fille	faible	pyramide	pis
bons	789.66	H	embryon	tuile	vaincu	amusante	vit
sofa	5.68	B	intérêt	vigne	anodin	moutarde	ode
moto	19.26	B	entravé	large	voyant	ancienne	une
payé	7.64	B	louable	genou	gérant	pèlerine	plu
tien	23.99	H	endroit	ainée	gitane	banalité	pue
tête	923.45	H	pulsion	route	tampon	vêtement	use
suée	1.96	B	avidité	tombe	tireur	personne	tue
voisin	81.82	H	éloigné	tir	fièvre	crinière	bac
tiroir	37.09	H	offense	tus	broche	derrière	eau
indice	9.39	B	fronton	mil	klaxon	vivacité	cil
abruti	6.69	B	attache	cri	cinglé	comtesse	lit
humour	16.76	B	classée	mot	émeute	appareil	ter
taille	76.49	H	crochet	pet	nymphes	équipage	peu
coffre	29.32	H	faction	ses	trouée	automate	ère
absolu	7.23	B	facteur	art	ballot	trouille	tif
mare	13.18	B	culture	merci	dégagé	sentence	proue
dîme	1.28	B	feutrée	crête	toison	rancoeur	bâche
alto	1.08	B	éveillé	dégât	sermon	messenger	cargo
drap	74.12	H	gobelet	frigo	bourre	poétesse	degré
java	2.3	B	équipée	vente	criard	négresse	canon
lent	64.12	H	moulant	halle	surnom	tailleur	court
noya	3858	H	caleçon	malle	trappe	pêcheuse	latin
oeuf	50.14	H	poignée	tract	truand	distance	sport
indien	7.16	B	balancé	tué	épopée	escabeau	plume
acacia	6.35	B	réforme	fié	guêtre	présence	champ
cabine	35.07	H	avancée	osé	druide	oreiller	buste
marque	37.7	H	spécial	vas	rapide	candidat	savon
orange	19.59	H	millier	zen	glacée	incendie	épine
volume	27.84	H	théière	dit	totale	national	arbre
accusé	11.69	B	bergère	vin	vision	ministre	trame
infini	18.31	B	avarice	vif	disque	vertical	bijou
orné	0.88	B	cocasse	arrêt	pelage	rousseau	toscane
avez	642649	H	sonnant	tueur	pelote	caniveau	créance
jonc	7.09	B	cliente	trait	détenu	revolver	fusible
cris	155.41	H	audible	copie	survie	surcroît	aromate
bats	18236	H	effréné	paume	forain	habillée	briseur
élue	4.73	B	avertie	recul	jovial	spéciale	ventilé
rues	562.97	H	sourire	match	rituel	adjudant	sellier
rime	2.16	B	effluve	frère	traite	danseuse	enrobée
accord	136.15	H	possédé	mai	ennuyé	fonction	trinité
cuiivre	36.08	H	foulard	nié	ravagé	prochain	pistard
agonie	14.59	B	ennemie	ska	turbin	courroie	lancier
ivoire	8.38	B	éclatée	col	vassal	fémminine	amuseur
invité	27.16	H	donneur	lui	ragoût	terrasse	attablé
injure	16.69	B	palabre	rie	tenant	dentiste	missile
agence	17.77	B	discret	nue	cossue	bruyante	modifié
blessé	30.34	H	manchon	dru	amorces	sandwich	papiste
même	1358.65	H	préjugé	digue	meuble	broderie	attention
sens	217.5	H	silence	barbu	danger	éclairée	sauvetage
viol	8.51	B	réflexe	rouge	dessin	ménagère	floraison
bled	8.04	B	surdité	phare	fermée	réplique	parachute
bure	3.18	B	cyclone	gitan	chaîne	bungalow	minuterie
doré	50.47	H	donnant	patio	maison	prétexte	trompette
nous	386784	H	garanti	otage	perdue	rapidité	prostituée
gaze	3.85	B	impasse	chant	crampe	débauche	assemblée

empire	63.51	H	mortier	est	manque	effectif	programme
jambon	13.24	B	enfoncé	far	volant	trottoir	endurance
détour	24.86	H	extrait	cet	pleine	fatalité	pharmacie
aïeule	10.61	B	général	rai	talent	scandale	confident
bougie	29.86	H	épisode	dus	acteur	fragment	transfert
garçon	262.5	H	révolte	ifs	défaut	charmant	postérité
jockey	8.24	B	virtuel	gré	exilée	créature	reddition
alarme	7.84	B	volante	cou	parure	vraiment	garnement
ravi	8.51	B	aubaine	récit	bobine	capuchon	éventualité
dôme	4.93	B	blindée	tissu	dédale	manuelle	encadrement
émût	3743	H	serveur	houle	fripée	bouillon	montagnarde
rôle	96.96	H	clairon	bruit	risque	souvenir	prisonnière
doge	3.45	B	dégoûté	péché	camion	campagne	réalisateur
rien	24.19	H	bonjour	loque	moteur	complexe	ingratitude
vire	3784	H	éclipse	rosée	erreur	mercredi	teinturière
saga	1.01	B	décisif	coupe	charme	physique	supportable
baiser	54.59	H	guichet	duc	crayon	lointain	décontracté
jumeau	17.77	B	semence	ris	cahier	certaine	puritanisme
alerte	13.11	B	domaine	fus	faveur	condamné	fabrication
voyage	140.07	H	horreur	jus	carnet	comptoir	hétéroclite
narine	25.81	H	trimard	fia	racine	intrigue	entrecroisé
jungle	8.38	B	pitance	bru	séance	interdit	entraînante
studio	22.09	H	torturé	bat	ménage	horloger	commentaire
amande	8.18	B	caverne	mal	idiotie	brûlante	préparation
grue	6.22	B	cessant	brame	rondin	médiocre	sou
chat	130.74	H	déficit	satine	glaise	bénéfice	béé
cône	3,38	B	payante	place	chacal	publique	arabe
bouc	10.07	H	raccord	grave	volute	calvaire	pitié
niée	0.34	B	guépard	ferme	famine	bracelet	bûche
public	38,04	H	satanée	sol	gourde	alouette	décalée
fusion	5.95	H	luciole	non	fâchée	protégée	colique
dans	829608	H	escadre	morse	garnie	innocent	ingénieur
sachet	5.41	B	poulain	pas	rouage	résultat	sépulture
pirate	5.47	B	ringard	sué	affilé	baguette	écrevisse
flacon	19,46	H	traitée	pie	guerre	sourdine	frisonnant
caveau	5.68	B	réglage	âne	modèle	couchant	infatigable
pâle	83,58	H	inscrit	métre	maline	grossier	mas
airs	690,81	H	hurleur	gaîté	fougue	chantage	pli
saxo	1,01	B	fédérée	océan	tendre	matraque	pro
trou	108,38	H	embolie	fonte	lavoir	mauvaise	cap
star	9,86	B	tribale	tuyau	livret	scénario	foi
rôti	3,24	B	emmurée	paire	rosier	enfantin	tek
saut	17,03	B	rotatif	brûlé	paumée	armement	ils
poil	76,01	H	renommé	drôle	satyre	registre	nie
espoir	101,89	H	festive	zou	futile	cuillère	zip
billet	63,58	H	étrenne	fui	saison	éclatant	fax
menace	44,12	H	captive	riz	gradin	indienne	mec
amarre	4,66	B	évasion	let	évasif	possible	gai
amante	6,76	B	ajustée	née	jasmin	première	via
lagune	8,92	B	céleste	osa	poussé	désarroi	gag
labeur	9,8	B	extrême	cru	étalon	ensemble	lac
maître	151,49	H	parfait	ado	hâtive	entrepôt	pua
plut	13980	H	labiale	forme	friche	vaisseau	piège
muet	3,04	B	servage	phono	hoquet	insolite	larme
rame	11,55	B	relieur	jaune	valise	mignonne	fuite
cale	6,15	B	conviée	façon	flamme	coiffeur	foyer
dune	12,84	B	infecté	cible	cinéma	soucoupe	lèvre
donc	44588	H	jetable	baume	brodée	tendance	piste
loua	2946	H	lanceur	texte	format	monsieur	soeur
aube	57,77	H	obstrué	mauve	gendre	familial	liste
amiral	13,51	B	perchée	uns	devise	donneuse	peste
laisse	19,26	B	théâtre	fil	hublot	entendue	haine
latine	15,07	B	platine	via	goûter	paupière	crêpe

épaule	288,72	H	ravagée	fat	nommée	complice	litre
amende	4,8	B	inertie	loi	enfant	médecine	calot
loisir	20,81	H	reculée	mal	nombre	rubrique	dandy
grille	58,24	H	réussie	hou	moitié	prouesse	homme
vallée	35,68	H	obligée	dès	éperon	touriste	usure
fève	1,89	B	féminin	fagot	cuisse	aéroport	péniche
cape	11,69	B	grumeau	lever	disant	fourrure	bleutée
solo	3,38	B	excepté	cuite	plombe	portrait	fournée
peur	311,69	H	potière	siège	séparé	escadron	maraude
haut	196,76	H	incluse	marée	loyale	entracte	tronche
tien	5,54	B	défiant	ongle	abrupt	barrière	cabinet
tend	21838	H	mitigée	hiver	perche	vendredi	contrée
idée	328,45	H	ganache	péril	trompe	ridicule	éminent
aplomb	9,05	B	fumerie	mie	allure	guerrier	fortuit
bouton	44,46	H	fervent	crû	destin	capitale	panache
anneau	17,5	B	frayeur	lys	guidon	assiette	normand
lavabo	16,89	B	exempte	dès	sultan	désordre	luzerne
nature	95,88	H	appétit	mou	foulée	baigneur	livreur
plante	35	H	lenteur	spa	turban	bannière	bâtisse
portée	33,85	H	treille	axé	ahurie	cardinal	éteinte
légion	16,35	B	épinard	âgé	souper	sérieuse	vaincue
caïd	7,97	B	griffée	cocon	douane	deuxième	gabardine
ruse	19,93	B	bowling	sacré	vitale	farouche	phénomène
îles	108,24	H	paprika	joint	secret	approche	maternité
exil	13,99	B	tonnant	paroi	visite	ambiance	hurlement
pire	57,7	H	ovoidal	nièce	spasme	perruque	confiture
hâta	2405	H	surfait	filet	vallon	évidence	filiation
lice	1,42	B	invenu	fiole	marché	création	particule
boit	27432	H	cabotin	antan	comité	mondiale	catalogue
époque	138,51	H	pensant	sui	étable	faubourg	menuisier
blague	22,7	H	capital	pré	faille	corridor	cotonnade
lierre	6,35	B	pommeau	vos	puéril	pavillon	voltigeur
jardin	185,81	H	obstiné	rit	tombée	chevalet	banquette
misère	47,23	H	reconnu	fin	dérive	frénésie	frivolité
argile	9,66	B	complet	sus	donnée	carabine	téléphone
liasse	11,69	B	renégat	gué	slogan	battante	pourboire
arcade	12,36	B	friable	gis	sainte	corniche	étiquette
repu	3,18	B	sarment	forêt	escale	pancarte	conquérante
coke	5,47	B	détaché	morte	châsse	sensible	charpentier
cime	9,73	B	arbose	damné	bateau	anarchie	consentante
fini	18,58	B	odyssée	boule	rideau	régiment	hallucinant
mien	3608	H	décibel	loyer	veille	imbécile	recensement
eaux	459,86	H	empotée	culte	formel	mâchoire	condoléance
note	77,43	H	gérance	seuil	trapue	supplice	insouciance
fend	2858	H	dorsale	fichu	sphère	secousse	impitoyable
longue	15,95	B	glouton	pât	flocon	tragédie	délabrement
ruelle	30,47	H	grutier	ais	avance	carnaval	circonspect
nation	47,23	H	fédéral	bus	action	méchante	inclinaison
volcan	5,34	B	métrage	lia	espace	gangster	filandreuse
artère	7,09	B	pluriel	été	voulue	endormie	sophistiqué
armure	8,11	B	sordide	ôté	rageur	aventure	boulangerie
amitié	77,77	H	échelle	bas	trombe	escalier	personnelle
reflet	50,74	H	scierie	blé	piquet	solitude	brillantine
halo	8,38	B	goéland	hôtel	limite	pastille	usa
intrus	5,47	B	moineau	fan	sommet	rescapée	toi
renard	11,96	B	guérite	puy	montre	chinoise	arc
thon	2,16	B	occulte	saint	fleuve	croisade	pelle
homard	5,34	B	couloir	pin	retard	tactique	signe
omis	0,2	B	chamois	lycée	rythme	gauloise	banquet
item	0	B	torsade	louve	témoin	batterie	posture
record	5,95	H	annonce	boa	épouse	éventail	apanage
âgée	30,74	H	victime	dinde	marbre	exercice	châtaigne
rameau	6,22	H	brigand	vol	alcool	remarque	coulevre

fiel	2,5	B	chaussé	frite	apeuré	chouette	gigantesque
acajou	5,95	H	adéquat	écu	mouche	doctrine	dérèglement
clip	1,28	B	déprime	allée	larcin	entrevue	roi
plan	88,99	H	tramway	coton	luxure	faisceau	mer
deçà	2,97	B	choléra	suite	mioche	pistolet	bée
gong	3,65	B	licence	seule	épatée	routière	lié
soit	1508547	H	assorti	temps	marmot	probable	bal
revu	13946	H	rouquin	fumet	acérée	brillant	kir
rôda	14,26	H	urbaine	gaine	ciselé	opticien	mûr
menu	14,53	B	récente	tyran	fiesta	élégance	bob
assise	9,66	B	million	nom	poudre	instante	bis
trésor	34,66	H	cabaret	rît	tordue	vitalité	sot
mousse	27,16	H	murette	rus	sieste	réalisme	uns
miroir	63,99	H	enclume	cep	tierce	offrande	gît
lourde	12,64	B	fiction	béa	phrase	caravane	bon
lustre	15,14	B	mercier	jeu	entier	fraction	eue
second	31,28	H	notable	bol	double	pionnier	vue
astuce	5,07	B	tilleul	fus	fidèle	lourdeur	car
midi	0,07	B	comique	valse	joueur	échéance	grade
écru	1,08	B	carence	piété	argent	impérial	poêle
club	21,42	H	ingrate	gifle	pliant	poétesse	éther
boue	53,31	H	ancêtre	oubli	fautif	méfiance	écrit
meut	13,18	B	recluse	nègre	option	étranger	patte
être	1508547	H	barrage	adieu	arrivé	grillage	trêve
iode	3,58	B	échelon	tante	outrée	location	cohue
pont	90,81	H	dépassé	armée	rieuse	militant	icône
cloche	34,59	H	cyclope	cru	clouté	immédiat	panne
langue	126,28	H	oubliée	ado	orient	angoisse	major
vivant	27,36	H	lyrique	fan	habité	espagnol	arche
maille	9,66	B	déguisé	nus	bouffi	officier	ruine
lycéen	10,61	B	plombée	mît	fécond	allusion	lundi
aurore	11,62	B	émotion	nos	lascar	flanelle	mufle
fierté	29,93	H	fraîche	box	méduse	lingerie	début
auvent	6,89	B	chaleur	kit	bibine	triangle	levée
suif	2,03	B	écartée	ordre	steppe	tournant	biberon
bois	27432	H	mutisme	tasse	hangar	critique	assidue
doué	7,57	B	pointée	borne	évêque	économie	optique
bols	25,14	H	exaltée	aïeul	relief	matériau	manager
ocre	4,46	B	bronche	bouée	finale	criminel	odieuse
huée	1,49	B	qualité	salve	rafale	rondelle	paysage
coin	199,26	H	abrupte	opéra	délice	banquier	moignon
dîna	5966	H	couplet	purée	calcul	atteinte	voilier
francé	23,11	H	boudoir	osa	laïque	instinct	couteau
ardeur	25,74	H	panneau	dis	élané	nocturne	volière
mairie	15,95	B	déplacé	van	avachi	pantalon	cadence
malice	10,95	B	cendrée	rue	basque	autorité	galoche
éclair	35	H	compote	lad	démodé	solution	mémoire
avatar	4,93	B	confuse	axa	démuni	visiteur	cruauté
prêtre	45,27	H	chinois	rif	enflée	musicien	vassale
averse	11,96	B	écharpe	nez	larbin	européen	bandeau
froc	7,64	B	symbole	berge	écarté	poitrine	cavalcade
clôt	3128	H	forcené	sapin	estime	harmonie	caissière
flot	45,95	H	déroute	lampe	froide	cachette	objection
pépé	16,96	B	modérée	crise	petite	duchesse	céramique
jeta	33682	H	fermeté	odeur	atroce	boiserie	tombereau
futé	1,89	B	intruse	enfer	sirène	solennel	baromètre
tube	20,47	H	galerie	tache	vanité	meilleur	provision
zinc	17,3	B	rêverie	barre	humain	divinité	normalien
badaud	6,82	B	murmure	pic	piston	fontaine	campement
manège	15,27	B	timorée	rut	ajusté	commande	évocation
avoine	6,96	B	entière	ami	ghetto	individu	militaire
barque	13,18	H	famille	mat	huilée	jeunesse	boulevard
couche	32,91	H	fébrile	tas	trempe	garnison	misérable

devoir	55,54	H	myriade	eus	blason	courrier	protocole
mandat	14,32	B	emblème	nem	bordée	destinée	pesanteur
buffet	21,35	H	piquant	mât	émigré	lanterne	semblable
liez		4608 H	lavande	faste	ticket	obstacle	frémissante
fond		3818 H	édredon	repli	pensée	problème	transparent
rixe	2,16	B	ordonné	phase	touche	patience	législateur
aile	60,47	H	bicorne	élite	roseau	addition	intouchable
zéro	18,24	B	dancing	polka	veston	mallette	immémoriale
turf	1,82	B	plafond	hutte	square	coulisse	expérimenté
tard	344,26	H	pimpant	stage	touffe	poignard	institution
riva	10,88	B	biscuit	démon	trajet	peuplier	avantageuse
bambin	4,66	B	traînée	bit	alcool	phalange	déconfiture
fureur	33,92	H	gruyère	six	marbre	amatrice	scintillant
ballet	8,24	B	injuste	soc	rythme	boulette	coefficient
police	83,72	H	plaquée	pop	témoin	promesse	patriotisme
manuel	8,18	B	prostré	pur	épouse	carillon	bolchevisme
brique	31,55	H	kiosque	age	retard	dérision	mirobolante
manoir	9,59	B	remuant	bug	fleuve	tourment	allégorique
cadeau	50,81	H	commode	usé	limite	toujours	asphyxiante
brio	1,89	B	étendue	hyène	fluide	division	gis
étalon	5,41	B	lassant	tué	percée	occupant	eut
four	28,99	H	confiné	biche	roussi	dévotion	préau
cigale	4,93	B	pikeur	lui	vocale	ouvrière	habit
glaçon	5,47	B	altérée	rie	toupie	scorpion	fable
laid	26,82	H	éperlan	faune	réseau	aussitôt	goudron
gâteau	32,16	H	illégal	rai	résumé	canadien	zèbre
défunt	6,28	H	colibri	cou	dément	déléguée	délégué
flop	0,27	B	limace	sabot	rivage	rigolade	aluminium
lier		4608 H	infirmes	mulet	salive	templier	fréquence
lynx	1,22	B	ouvrant	maire	fumier	chaussée	édification
trou	108,38	H	poterie	mal	lièvre	régulier	historienne
diva	1,28	B	élément	alibi	sillon	croyante	ton
perd		37736 H	égoïsme	pomme	saveur	totalité	mue
cour	176,96	H	planque	algue	tonton	chapitre	gaz
buté	8,58	B	oraison	culot	écurie	monotone	but
cake	41,82	H	charrue	abîme	effroi	brillant	don
tuer	1250,41	H	sauteur	ville	saleté	longueur	rué
sape	5,95	B	magasin	calme	teinte	consigne	bec
rate	1,28	B	touchée	fossé	virage	banlieue	vie
patron	132,03	H	algèbre	top	veneur	voyageur	pic
humeur	58,04	H	austère	bel	aimant	tragique	lad
marine	12,77	B	reliure	cor	arquée	bouillie	ans
mariée	16,08	B	servile	sac	écoulé	attelage	lue
équipe	34,32	H	chassée	oui	hébreu	croyante	mis
banane	7,57	B	volonté	feu	tannée	totalité	née
espèce	141,69	H	naturel	air	trahie	chapitre	ont
bandit	8,85	B	aimable	axe	mortel	monotone	fac
aise	52,64	H	portion	forge	torche	maîtrise	amant
ogre	5,95	B	évasive	clair	avenir	vivement	cause
lava		6953 H	terreur	baron	droite	marchand	femme
vécu	5,34	B	épingle	bourg	chaise	réussite	tenue
fuma		8439 H	emphase	bride	savant	voyageur	malin
sein	84,05	H	froncée	foire	verrou	tragique	front
lard	11,28	B	éditeur	vitre	remise	bouillie	autel
bise	8,72	B	préposé	chéri	grappe	attelage	arène
balcon	40,41	H	semaine	psy	oracle	football	échec
étouffé	28,24	H	attirait	par	bohème	rhubarbe	ancrage
marron	7,36	B	carnage	bue	fictif	cassette	honte
bavard		5 B	cadavre	vas	living	cuirasse	motte
martyr	6,76	B	désigné	roi	normal	maîtrise	bèche
numéro	70,07	H	pillard	oie	corset	vivement	poème
blouse	32,64	H	sauveur	fer	mimosa	marchand	serre
baquet	4,86	B	voisine	gym	novice	réussite	piano

cuve	4,32	B	pelouse	acier	rousse	collègue	réputée
cira		2027 H	démodée	email	simple	brancard	enlevée
moka	1,89	B	buisson	juron	occupé	fatiguée	paddock
pesa		7088 H	réponse	verre	extase	écriture	taillée
cita		2709 H	unanime	conte	verger	inconnue	rampant
sais		532899 H	flurette	géant	écorce	créateur	veinard
troc	2,03	B	latente	secte	battue	cassette	bénigne
lobe	2,09	B	soulevé	cahot	bâtard	cuirasse	présent
bassin	25,2	H	chanson	sot	schéma	consERVE	chargée
menthe	9,53	B	blanchi	riz	ajouré	moquette	ciselée
bonnet	18,58	B	dortoir	fié	besace	lycéenne	apeurée
pauvre	53,24	H	débâcle	fié	bolide	quartier	coucher
région	53,31	H	fournée	sur	chahut	chapelet	doublée
office		25 H	buvette	osé	fiente	ailleurs	vidange
boudin	7,57	B	infecte	uni	varech	commerce	endurci
massif	12,23	B	inanimé	toc	cambré	fantasme	crudité
prêt	121,28	H	sandale	tempe	énigme	penchant	acheteuse
secs	142,84	H	blouson	harpe	grosse	clinique	mobylette
loge	22,36	H	rentier	loupe	colère	panorama	allégorie
jeté	9,32	B	service	béret	triste	souriant	nettoyage
robe	148,18	H	matrice	galon	triste	incident	comptable
duel	5,95	B	mélopée	passé	peuple	milicien	aumônière
gala	3,65	B	oranger	dette	penché	argument	abondance
rêne	5,74	B	diamant	canot	devant	blessure	croissant
rangée	20,47	H	latéral	bof	sévice	cantique	ambiguïté
bougre	11,22	B	brioche	bis	ulcère	orphelin	substance
bouffe	7,36	B	château	due	aperçu	réaction	maréchale
Pierre	189,86	H	désolée	ouf	global	histoire	cicatrice
mérite	18,99	B	campeur	set	notice	légèreté	clochette
soupir	35,95	H	rescapé	dix	rôdeur	euphorie	accouoir
canapé	20,27	H	maçonne	ire	validé	citation	hostilité
miette	17,16	B	hébétée	web	mazout	gendarme	aviatrice
beau	620,07	H	hôpital	écran	galère	gentille	trafiqante
vous		350716 H	gisante	revue	livide	familier	aventurière
bile	4,66	B	éplorée	vivre	souche	bûcheron	résignation
pair	6,62	B	étriqué	teint	turque	familier	encombrante
auto	42,36	H	bouleau	année	hameau	violence	marchandise
sien		3608 H	matonne	astre	sortir	nourrice	fuligineuse
urne	3,38	B	maligne	veuve	goulot	amertume	prérogative
môle	3,92	B	fatigue	ronde	député	acheteur	inoffensive
réveil	28,58	H	honneur	exo	kimono	communal	inconscient
mignon	7,91	B	résille	tél	laitue	escarpin	intentionné
panier	33,18	H	exténué	lin	noyade	complète	malveillant
mineur	11,96	B	carrure	vis	réjoui	tablette	nauséabonde
bourse	13,18	B	moyenne	bac	retiré	seigneur	transitoire
whisky	25,47	H	réjouie	dît	ingrat	immobile	législative
gloire	50,88	H	radical	ces	médian	chanteur	attachement
boulet	8,11	B	cellule	roc	pilori	toilette	malédiction
cheval	179,26	H	détesté	tôt	minute	consigne	mou
repère	9,59	B	croûton	bus	requin	banlieue	fée
souris	22,57	H	amphore	blé	trafic	humilité	kif
cerf	25,54	H	frontal	vodka	tomate	familier	bazar
vote	4,46	B	attente	tigre	violon	violence	perle
jeep	2,97	B	rayonne	masse	sérail	bûcheron	flamand
housse	5,68	B	belette	ail	timbre	longueur	panique
codé	0,74	B	colombe	sable	soldat	familier	promotion
rivale	10,2	B	hulotte	ému	temple	brillant	promenade
ivre	27,7	H	rancard	merle	départ	humilité	admiratrice
nerf	30,47	H	métayer	poule	hasard	gentille	détachement
survie	6,08	H	semoule	der	pudeur	sanglier	académicien
noms		395 H	cloutée	débit	régale	carcasse	sel
visé	1,62	B	éclairé	union	rincée	alliance	loi
voie	71,01	H	morbide	sueur	senior	agressif	fou

marc	3,38	B	bigoudi	prise	serial	furieuse	put
bloc	38,78	H	amateur	crème	soluté	traverse	mua
toge	1,55	B	masquée	coque	squash	dauphine	tri
hôte	20,2	H	certain	oncle	tonale	crevasse	mon
hâle	3,04	B	soutane	manie	toxine	horrible	des
chemin	231,42	H	théorie	sud	abonné	nourrice	bat
ancien	29,66	H	menteur	aïe	badine	amertume	pas
plaine	39,86	H	hérésie	que	bécher	acheteur	aie
braise	12,23	B	pouvoir	île	cépage	penchant	nié
mollet	14,93	B	emmêlée	âge	distal	clinique	sue
manche	59,39	H	revêche	pub	focale	panorama	haï
boxeur	7,97	B	prieure	vos	foreur	souriant	clé
mirage	10,07	B	alignée	sus	gigoté	incident	nés
ouïe	4,46	B	tisanes	herbe	oublie	monument	objet
relu	0,74	B	propret	stade	utopie	chanoine	furie
sert	28622	H	gousset	mètre	lutrin	logement	hymne
émet	17,23	B	profond	pompe	mièvre	bonhomme	jupon
dure	146,69	H	endormi	élève	racial	effusion	boyau
erra	2736	H	nageuse	blond	sésame	serveuse	drame
épée	25,2	H	gardien	blanc	éclopé	générale	veste
sève	7,91	B	soudain	taule	élixir	pénombre	latte
ordure	26,55	H	bourbon	nos	intimé	blesse	jetée
brèche	9,59	B	ténèbre	box	lambel	collègue	point
troupe	105,41	H	opprimé	gel	largue	brancard	série
breton	4,86	B	magique	arc	morgon	fatiguée	chose
montée	15,61	B	sommité	pal	onglée	écriture	chaud
morgue	7,03	B	pliante	hit	ongulé	inconnue	école
caisse	69,39	H	médical	zip	pistou	compagne	songe
prénom	30,47	H	périmée	son	plier	poubelle	éclat
mise	39,86	H	motrice	dégel	exclue	véhicule	interne
pôle	3,99	B	oiseuse	nylon	magnat	paquebot	acolyte
hôte	18,04	B	escorte	affût	rafiot	anglaise	crachin
dard	2,84	B	arrêtée	farce	brisée	étonnant	demeuré
quoi	210,88	H	secrète	craie	floral	apparent	horizon
orna	3115	H	conique	givre	liseur	immeuble	parlant
noie	3858	H	étagère	sceau	révélé	objectif	mondial
lave	3,51	B	émigrée	enjeu	amorti	conduite	loufiat
boucle	29,86	H	experte	nui	tarpon	suiivante	serment
moulin	19,05	B	drachme	mis	genèse	aviation	opposée
motard	6,89	B	orfèvre	bio	gêneur	confrère	bouchée
bûcher	9,59	B	sublime	moi	imagée	étudiant	germain
séjour	43,58	H	obscène	née	mouise	chantier	diffuse
parole	178,31	H	revient	rua	mutine	gaiement	évanoui
minuit	29,86	H	figuier	tua	pâques	invasion	excitée
nomade	4,86	B	souhait	les	perlée	fidélité	filleul
zèle	10,68	B	mamelle	brise	mordue	violette	monarchie
rôle	9,46	B	branche	lacet	dépité	roulette	laboureur
rend	46811	H	inégale	thème	mature	tabouret	chevelure
cave	56,35	H	méchant	offre	nantie	bourreau	monticule
oser	3757	H	civique	pouce	replet	agrément	équilibre
faut	125041	H	spatule	franc	arrosé	vinaigre	politesse
muse	1,35	B	ballant	sabre	bistre	guérison	dictateur
poli	16,69	B	galante	salle	cahute	plancher	paillette
papier	203,11	H	éberlué	pût	ramier	attitude	placement
budget	6,62	B	pesante	tac	ratage	quiétude	insolence
nausée	10	B	corolle	lue	simili	dentelle	concombre
cheveu	270,68	H	achevée	zoo	verdie	position	assistant
museau	12,64	B	lamelle	fée	abrité	avantage	organisme
buveur	4,66	B	cascade	puy	castel	douanier	réflexion
valeur	52,3	H	galonné	olé	croate	français	cuillerée
beauté	92,64	H	brigade	sûr	méléze	enjambée	propriété
sans	222412	H	blesmée	naine	apogée	espionne	complimenté
sauf	6,69	B	traître	photo	engagé	camarade	marchandage

cran	8,11	B	conteur	arête	éolien	magazine	mésaventure
gaie	41,76	H	rebondi	tente	fêlure	puissant	automatique
visa		2757 H	courbée	jeudi	infant	conquête	dégueulasse
grog	1,42	B	contact	bible	éméché	prestige	imaginative
truc	87,77	H	voleuse	durée	galant	peignoir	restriction
aléa	1,01	B	auguste	balle	imitée	fermière	instituteur
grande	127,64	H	méthode	épi	croule	tribunal	analphabète
cachot	7,09	B	boucher	pin	débite	évangile	conformiste
notion	14,05	B	effarée	hip	dextre	dialogue	irréfutable
cachet	10,2	B	pendant	ose	favela	initiale	explicative
menton		60 H	cratère	vus	fumage	humidité	norvégienne
classe	108,92	H	casseur	ans	jogger	attachée	vétérinaire
malade	43,18	H	seconde	eux	lolita	sûrement	excentrique
nudité	13,51	B	notoire	jet	picote	libraire	particulier
niveau	32,91	H	portail	ver	insert	argument	fil
résine	5,54	B	rongeur	ira	hautin	milicien	qui
mouton	30,47	H	crachée	eus	plumée	relation	idole
agneau	8,78	B	érosion	pin	tannin	document	poste
mont	18,92	B	avachie	musée	hammam	cercueil	mouette
abbé	33,51	H	lévrier	talon	coudée	bretonne	amirale
pavé	26,62	H	poisson	bâton	dosage	discrète	princesse
faon	1,08	B	diocèse	écume	sonate	justesse	ignominie
pointe	83,85	H	morsure	ami	poulet	dimanche	branchage
teck	0,34	B	véreuse	morue	piéton	syndicat	batailleuse
émir	0,81	B	soignée	vache	reposé	patronne	ressemblant
chauve	5,47	B	paraphe	nef	raseur	panthère	compositeur

