

Université de Montréal

Le rôle des fréquences spatiales dans l'effet d'encombrement en identification de lettres.

par
Sacha Zahabi

Département de psychologie
Faculté d'arts et sciences

Mémoire présenté à la faculté d'arts et sciences
En vue de l'obtention du grade de maîtrise (M.Sc.)
En Psychologie

© Sacha Zahabi, 2010

Université de Montréal
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé :

Le rôle des fréquences spatiales dans l'effet d'encombrement en identification de lettres.

Présenté par :

Sacha Zahabi

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Pierre Jolicoeur
président-rapporteur

Martin Arguin
directeur de recherche

Frédéric Gosselin
membre du jury

Résumé

L'effet d'encombrement, qui nous empêche d'identifier correctement un stimulus visuel lorsqu'il est entouré de flanqueurs, est omniprésent à travers une grande variété de classes de stimuli. L'excentricité du stimulus cible ainsi que la distance cible-flanqueur constituent des facteurs fondamentaux qui modulent l'effet d'encombrement. La similarité cible-flanqueur semble également contribuer à l'ampleur de l'effet d'encombrement, selon des données obtenues avec des stimuli non-linguistiques. La présente étude a examiné ces trois facteurs en conjonction avec le contenu en fréquences spatiales des stimuli, dans une tâche d'identification de lettres. Nous avons présenté des images filtrées de lettres à des sujets non-dyslexiques exempts de troubles neurologiques, tout en manipulant l'excentricité de la cible ainsi que la similarité cible-flanqueurs (selon des matrices de confusion pré-établies). Quatre types de filtrage de fréquences spatiales ont été utilisés : passe-bas, passe-haut, à large bande et mixte (i.e. élimination des fréquences moyennes, connues comme étant optimales pour l'identification de lettres). Ces conditions étaient appariées en termes d'énergie de contraste. Les sujets devaient identifier la lettre cible le plus rapidement possible en évitant de commettre une erreur. Les résultats démontrent que la similarité cible-flanqueur amplifie l'effet d'encombrement, i.e. l'effet conjoint de distance et d'excentricité. Ceci étend les connaissances sur l'impact de la similarité sur l'encombrement à l'identification visuelle de stimuli linguistiques. De plus, la magnitude de l'effet d'encombrement est plus grande avec le filtre passe-bas, suivit du filtre mixte, du filtre passe-haut et du filtre à large bande, avec différences significatives entre les conditions consécutives. Nous concluons que : 1- les fréquences spatiales moyennes offrent une protection optimale contre l'encombrement en identification de lettres; 2- lorsque les fréquences spatiales moyennes sont absentes du stimulus, les hautes fréquences protègent contre l'encombrement alors que les basses fréquences l'amplifient, probablement par l'entremise de leur impact opposé quant la disponibilité de l'information sur les caractéristiques distinctives des stimuli.

Mots-clés: encombrement, identification de lettres, fréquences spatiales, confusabilité.

Abstract

Visual crowding, which impairs our ability to accurately identify a target stimulus when surrounded by flankers, is ubiquitous across a wide variety of stimulus classes. Target eccentricity and target-flanker distance constitute fundamental factors in crowding. Target-flanker similarity appears as another key factor based on findings obtained with non-linguistic stimuli. The present study investigated the impact of these factors in conjunction with spatial frequency content on single letter identification performance. We presented spatial frequency filtered letters to neurologically intact nondyslexic readers while manipulating target-flanker distance, target eccentricity and target-flanker similarity (metric based on published letter confusion matrices). Spatial frequency filtering conditions were broadband, low-pass, high-pass and hybrid (i.e. medium spatial frequencies, known as optimal for letter recognition, removed from the stimulus). These conditions were matched on overall contrast energy. Participants were required to identify the target letter as fast and as accurately as possible. The results show that high target-flanker similarity enhances crowding, i.e. the joint effects of distance and eccentricity. This extends past findings on the impact of similarity on crowding to the visual identification of linguistic materials. Most importantly, the magnitude of the crowding effect is greatest with low-pass filtering, followed by hybrids, high-pass, and broadband, with all pairwise contrasts significant. We conclude that: 1- medium spatial frequencies provide optimal protection from crowding in letter recognition; 2- when medium spatial frequencies are absent from the stimulus, low spatial frequencies magnify crowding and high spatial frequencies protect against it, most likely through their opposite impact on the availability of distinctive feature information.

Keywords: visual crowding, letter identification, spatial frequencies, letter confusability.

Table des matières

Problématique.....	1
Contexte théorique.....	2
Hypothèses.....	9
Méthodologie.....	10
Sujets.....	10
Matériel.....	10
Procédure.....	11
Résultats.....	13
Temps de réponse.....	13
Taux d'erreurs.....	17
Discussion.....	23
Références.....	31

Liste des tableaux

Tableau 1: Régressions linéaires des temps de réponse aux essais corrects en fonction de la distance entre les lettres14

Tableau 2: Régressions linéaires des taux d'erreurs en fonction de la distance entre les lettres16

Liste des figures

- Figure 1: Temps de réponse en fonction de la distance entre les lettres pour les deux niveaux de confusabilité et les deux niveaux d'excentricité..... 16
- Figure 2: Temps de réponse en fonction de la distance entre les lettres pour les deux niveaux de confusabilité et les quatre types de filtrage..... 17
- Figure 3: Taux d'erreurs en fonction de la distance entre les lettres pour les deux niveaux de confusabilité et les quatre types de filtrage lors des essais en périphérie..... 16
- Figure 4: Taux d'erreurs en fonction de la distance entre les lettres pour les deux niveaux de confusabilité et les quatre types de filtrage lors des essais en fovéa..... 16

Liste des abréviations

ANOVA : analyse de variance (« analysis of variance »)

ISI : intervalle inter-stimulus (« inter-stimulus interval »)

Problématique

L'effet d'encombrement (« crowding ») concerne la difficulté à identifier un stimulus visuel en vision périphérique lorsqu'il est entouré d'autres stimuli visuels desquels nous intégrons excessivement les attributs (Pelli, Tillman, Freeman, Su, Berger & Majaj, 2007). L'effet d'encombrement se manifeste dans l'identification et la discrimination d'une grande variété de classes de stimuli (Levi, 2008). L'étude que nous proposons ici s'intéresse à l'effet d'encombrement sur la reconnaissance de lettres et plus particulièrement, au rôle joué par les fréquences spatiales dans ce phénomène. Une motivation sous-jacente à cette approche est de clarifier notre compréhension des mécanismes de traitement des lettres, déficients dans certains troubles neurologiques comme la dyslexie lettre-par-lettre.

Contexte théorique

L'effet d'encombrement implique que lorsqu'une cible visuelle est présentée en vision périphérique, elle devient très difficile à identifier si elle est entourée d'autres objets, appelés flanqueurs (Pelli & Tillman, 2008). Il semble que cet effet d'encombrement puisse également survenir en vision centrale si la distance entre la cible et les flanqueurs est très faible (Levi, 2008).

Pelli, Palomares et Majaj (2004) ont démontré que la présence de flanqueurs autour de la cible détériore les performances de l'observateur dans l'identification de

celle-ci mais n'affecte aucunement sa détection. Dans une tâche d'identification de lettres par exemple, nous pouvons percevoir qu'il y a trois lettres dans notre champ périphérique, sans toutefois pouvoir identifier celle du milieu. Il a été proposé que l'intégration excessive des attributs des flanqueurs cause de l'interférence sur l'identification de la cible, ce qui distingue l'effet d'encombrement de celui des masques visuels, qui interfèrent avec la détection de la cible (Pelli, Palomares, & Majaj, 2004). D'ailleurs, l'explication de l'effet d'encombrement la plus acceptée jusqu'à présent implique que les attributs de la cible et des flanqueurs sont normalement détectés de façon indépendante, dans la mesure où la distance qui les sépare est suffisante. Par contre, lorsqu'ils font partie du même champ d'intégration, ils sont intégrés en un tout perceptuellement incohérent (Levi, 2008). En effet, en vision fovéale, le système visuel utilise normalement des champs d'intégration de taille adaptée aux stimuli mais en vision périphérique, les champs d'intégration sont plus grands, ce qui peut nuire à la discrimination entre les stimuli (Pelli, Palomares, & Majaj, 2004). Dans un même ordre d'idée, Levi (2008) propose un modèle explicatif de l'encombrement en deux étapes, la première impliquant la *détection* d'attributs simples (dans l'aire V1 du cerveau) et la deuxième impliquant leur *intégration* (au delà de l'aire V1). Levi (2008) note l'importance du traitement descendant dans ce processus, en précisant toutefois que le rôle de l'attention demeure incertain.

Les résultats de nombreuses études sur l'effet d'encombrement ont révélé certains facteurs qui modulent ce phénomène. Il a été démontré que l'effet d'encombrement est fonction de la distance inter-stimuli et qu'il y a une distance critique au-delà de laquelle il

n'y a pas d'encombrement (Pelli et al., 2007). À son tour, la distance critique dépend principalement de l'excentricité, c'est-à-dire la distance de la cible par rapport au point de fixation (Pelli et al., 2007). Bouma (1970) a démontré qu'afin qu'une lettre soit complètement isolée et donc identifiable, aucune autre lettre ne doit être présente à une distance inférieure à $0,5 \times$ son excentricité. De plus, Pelli et al. (2007) ont démontré que ce rapport entre la distance critique et l'excentricité est indépendant de la taille des lettres : la capacité à identifier la cible entourée de flanqueurs dépend non pas de leur taille directement, mais de la distance entre eux (en proportion de leur taille). Il est à noter que cette « loi de Bouma » (qui définit le rapport entre la distance critique et l'excentricité) est valide indépendamment de la classe d'objet (Pelli & Tillman, 2008). Il est également important de noter que plus les flanqueurs sont visuellement similaires à la cible, plus cela amplifie l'effet d'encombrement, sans toutefois moduler la distance critique (Levi, 2008).

Pelli et al (2007) ont démontré que dans des conditions normales de lecture, l'empan visuel équivaut au nombre de caractères qui ne sont pas encombrés au moment d'une fixation. Nous rappelant que lorsque nous lisons, nous produisons en moyenne quatre fixations par secondes (Huey, 1908), Pelli & Tillman (2008) indiquent qu'une grande partie de notre champ visuel est encombrée durant chaque fixation, ne laissant qu'une petite « fenêtre non-encombrée » en vision fovéale. Ceci nous permet toutefois de traiter plusieurs lettres en parallèle avant de déplacer nos yeux pour en traiter d'autres. Une méta-analyse de Pelli & Tillman (2008) rapporte d'ailleurs un lien étroit entre la taille de l'empan et la vitesse de lecture chez les sujets normaux. Cependant, cette méta-

analyse démontre aussi que chez les personnes avec une dyslexie développementale, la vitesse de lecture est beaucoup moins grande que ce qui est prédit par leur empan, suggérant ainsi qu'un autre phénomène doit être en jeu (Pelli & Tillman, 2008). Par ailleurs, dans son étude dissociant l'effet du « nombre de lettres par mots » de celui de « l'étendue spatiale par mots », McDonald (2006) suggère que l'effet d'encombrement, plus grand avec des mots longs, prolonge la durée de fixation pour chaque lettre et augmente le nombre de fixations qu'un mot reçoit.

Tel que mentionné plus haut, nous nous intéressons ici à un facteur de « bas niveau » qui est susceptible d'influencer l'effet d'encombrement, c'est-à-dire les fréquences spatiales. Étant donné que les lettres contiennent une étendue de fréquences spatiales, plusieurs études récentes ont cherché à déterminer quelles fréquences étaient utilisées par le système visuel afin d'identifier des lettres (Grainger, Rey, & Dufau, 2008). La question est d'autant plus importante qu'il a été démontré par Pelli, Farell et Moore (2003) que la lecture d'un mot dépend a priori de l'efficacité du système visuel à identifier chacune des lettres séparément. Une méthode utilisée dans certaines de ces études est le « critical band masking », qui consiste à appliquer des masques de bruit visuel de différentes fréquences spatiales sur des lettres pour ensuite mesurer la performance des sujets dans une tâche d'identification (Majaj, Pelli, Kurshan & Palomares, 2002). Il a été démontré que le bruit de fréquence spatiale autour de 3 cycles/lettre détériore le plus les performances d'identification (Majaj, Pelli, Kurshan & Palomares, 2002). Ceci suggère que les fréquences spatiales optimales pour l'identification des lettres se situent à environ 3 cycles/lettre. En accord avec ces

résultats, une étude récente de D. Fiset, Blais, Éthier-Majcher, Arguin, Bub et Gosselin, (2008), utilisant la technique des Bulles de Gosselin et Schyns (2001), a démontré que les fréquences spatiales entre 2 et 4 cycles/lettre contiennent l'information visuelle la plus importante pour l'identification des lettres. L'étude de Majaj et al. (2002) a également démontré que le système visuel semble toujours utiliser le même canal de $1,6 \pm 0,7$ octaves pour identifier des lettres, peu importe si le bruit qui les masque laisse passer toutes les fréquences spatiales, seulement les hautes ou seulement les basses. Le choix du canal serait déterminé par le signal et non par le bruit. Bien que le système visuel dispose de plusieurs canaux de traitement de fréquences spatiales (De Valois & De Valois, 1988), il persisterait donc à utiliser le même canal pour le même signal, sans changer de canal en fonction des différents bruits (Majaj et al., 2002; voir aussi Solomon & Pelli, 1994). Selon les auteurs, ceci suggère que le canal est sélectionné de façon ascendante par la nature du stimulus à identifier (i.e. le signal) et non de façon descendante par le système visuel.

Une autre technique utilisée pour étudier le rôle des fréquences spatiales en identification de lettres consiste à mesurer le seuil d'identification en fonction de différents filtres qui ne laissent passer que certaines fréquences (Grainger et al., 2008). Tel qu'indiqué par Grainger et al. (2008), plus d'information utile est disponible avec un filtre passe-haut (« high pass »; qui ne laisse passer que les plus hautes fréquences), ce qui fait en sorte que les lettres sont mieux identifiées avec ce type de filtre comparativement à un filtre passe-bas (« low pass »; qui ne laisse passer que les plus basses fréquences). De plus, les résultats d'une étude de D. Fiset, Gosselin, Blais et

Arguin, (2006), suggèrent que les basses fréquences spatiales sont responsables de l'effet important de confusabilité de lettres chez les personnes avec une dyslexie lettre-par-lettre (qui semblent avoir un biais pour ces basses fréquences à cause de leur lésion au lobe occipito-temporal gauche). La confusabilité d'une lettre dépend de la similarité de sa forme par rapport à celle des autres lettres de l'alphabet (S. Fiset et al., 2006). La valeur de confusabilité est déterminée préalablement en mesurant la performance de sujets normaux dans des tâches très difficiles d'identification de lettres isolées, où les taux d'erreurs sont typiquement de 50% (D. Fiset, Blais, Arguin, Tadros, Éthier-Majcher, Bub, & Gosselin, 2009). Il a été démontré que les lettres hautement confusables ralentissent considérablement la vitesse de lecture de mots chez les patients avec une dyslexie lettre-par-lettre (Arguin, S. Fiset & Bub, 2002). Une autre étude, de S. Fiset, Arguin et D. Fiset (2006), a d'ailleurs démontré que chez des sujets normaux, la lecture de mots filtrés passe-bas induit un effet de confusabilité de lettres important, qui est pourtant absent avec une présentation normale (sans filtre et avec une distance standard entre les lettres).

Pour faire le lien avec l'effet d'encombrement, notons que des données non-publiées provenant de notre laboratoire suggèrent un effet d'interaction entre la distance des lettres et leur niveau de confusabilité, chez des sujets normaux et avec des lettres non-filtrées. Spécifiquement, l'effet délétère de la proximité des flanqueurs est amplifié lorsque ceux-ci présentent un haut niveau de confusabilité avec la cible.

Il semble que très peu d'études se soient penchées sur le rôle du traitement des fréquences spatiales dans l'effet d'encombrement. Hess, Dakin et Kapoor (2000) se sont

intéressés à savoir si l'effet d'encombrement pouvait être expliqué simplement sur la base des propriétés physiques du stimulus plutôt que par la physiologie du système visuel. Leur expérience consistait, pour des sujets normaux, à déterminer l'orientation d'un « C de Landolt » présenté en vision fovéale. Étant donné la plus faible sensibilité rétinienne pour les fréquences spatiales les plus élevées (relativement aux fréquences moyennes), la performance devrait être dégradée si les fréquences spatiales les plus pertinentes pour discriminer la cible des flaqueurs sont trop élevées (Hess et al., 2000). Les résultats démontrent que dans la condition avec encombrement (le C entouré des quatre barres), les fréquences spatiales utilisées pour la réalisation de la tâche étaient augmentées d'une demi-octave relativement à la condition sans encombrement. Hess et al. (2000) en ont donc conclu que les propriétés physiques du stimulus forcent le système visuel à adopter une échelle spatiale qui, bien que contenant les informations les plus pertinentes pour la tâche, sont trop élevées pour permettre une performance optimale.

Chung, Levi et Legge (2001) ont également manipulé les propriétés physiques de stimuli visuels pour examiner l'effet d'encombrement chez des sujets normaux en utilisant des lettres régulières. Les lettres ont d'abord été filtrées pour en produire différentes versions contenant chacune une étendue restreinte de fréquences spatiales centrées soit à 0,63 cycle/lettre pour les plus basses ou à 10 cycles/lettre pour les plus hautes (Chung et al., 2001). Les lettres filtrées, ont été présentées avec ou sans flaqueurs en vision fovéale ou à une excentricité de 5 degrés d'angle visuel (Chung et al., 2001). La variable dépendante était le seuil de contraste requis pour identifier la lettre cible. Les résultats démontrent qu'en présence de flaqueurs, la réduction de la distance entraîne

une augmentation du seuil de contraste requis pour identifier la cible dans la condition où les fréquences spatiales des flanqueurs sont similaires à celles de la cible. Il est important de noter que cet effet a la même forme, que les lettres soient présentées en vision fovéale ou à 5 degrés d'excentricité (Chung et al., 2001).

Chung et Tjan (2007) ont utilisé une technique de filtrage de fréquences spatiales similaire à celle de Chung et al., (2001), et ont présenté à des sujets normaux des trigrammes contenant chacun la lettre cible au centre et un flanqueur de chaque côté, selon trois niveaux de distance (faible, normale, grande). Les résultats ont démontré que le système visuel décale sa sensibilité vers des fréquences spatiales plus élevées lorsque la lettre est entourée de flanqueurs, mais seulement dans la condition avec la distance la plus faible (Chung & Tjan (2007). Ce décalage était de 0,17 octave lorsque les lettres étaient présentées en vision fovéale et de 0,19 octave en vision périphérique (Chung & Tjan (2007). Par ailleurs, une étude de Nandy & Tjan (2008) a démontré que pour des lettres présentées seules, l'efficacité du système visuel à intégrer les attributs des lettres à travers les différentes fréquences spatiales est la même en périphérie qu'à la fovéa.

Les études qui précèdent ont examiné soit l'impact de l'effet d'encombrement sur les fréquences spatiales sous-tendant les performances (Hess et al., 2000; Chung & Tjan, 2007), ou encore la modulation de l'effet d'encombrement par la relation cible-flanqueurs en termes des fréquences spatiales qu'ils contiennent (Chung et al, 2001). Dans la présente étude, l'objectif visé est plutôt de déterminer comment le contenu en fréquences spatiales des lettres module (amplifie ou diminue) l'impact de la confusabilité flanqueurs-

cible sur l'effet d'encombrement. Spécifiquement, les lettres présentées auront un contenu en termes de fréquences spatiales selon le filtrage suivant : passe-haut, passe-bas, mixte ou à large bande (i.e. présentation normale). Dans le cas du filtre mixte, les basses et les hautes fréquences spatiales présentes dans les lettres seront conservées mais la bande de fréquences spatiales intermédiaires, reconnue comme critique pour l'identification de lettres, aura été éliminée. Évidemment, la distance cible-flanqueurs sera également manipulée (0,8x ; 1,0x ou 1,2x ; x étant la hauteur de la lettre « x »), tout comme la confusabilité des flanqueurs avec la cible (basse vs haute).

Hypothèses

Compte tenu de ce qui précède, il est attendu que l'effet d'encombrement (i.e. réduction des performances avec la distance cible-flanqueurs) soit accentué par une augmentation de l'excentricité et de la confusabilité. En accord avec les résultats d'une étude pilote menée dans notre laboratoire, nous prévoyons également une interaction distance x confusabilité x excentricité, à savoir que l'interaction connue entre la distance et l'excentricité sera amplifiée dans la condition avec haute confusabilité. Il est également attendu que les performances d'identification seront meilleures dans les conditions avec les lettres présentées normalement (avec le filtre à large bande) que dans les conditions avec les lettres dégradées (avec les trois autres filtres), étant donné que dans le premier cas il y a plus d'information disponible que dans le deuxième. Comme les hautes fréquences spatiales semblent moins susceptibles à l'encombrement (Chung & Tjan,

2007) et qu'elles contiennent plus d'information utile à l'identification des lettres que les basses fréquences (Grainger et al., 2008), il est possible que l'effet d'encombrement soit plus marqué avec le filtre passe-bas qu'avec les filtres mixte et passe-haut. Enfin, puisque les basses fréquences spatiales semblent responsables de l'effet de confusabilité de lettres, il est attendu que cet effet (et son impact délétère sur l'effet d'encombrement) soit amplifié par les filtres passe-bas et mixte relativement aux autres conditions. Un aspect pour lequel les données présentement disponibles ne permettent pas de formuler une prédiction mais auquel l'expérience proposée offrira une réponse est à savoir si la présence des hautes fréquences spatiales dans le filtre mixte peut agir en tant que facteur de protection relativement au filtre passe-bas.

Méthodologie

Sujets. Douze participants âgés entre 19 et 28 ans (6 hommes & 6 femmes), avec une vision normale ou corrigée, ont pris part à l'expérience. Le recrutement s'est fait par affichage ou par l'entremise d'une base de données de participants s'étant portés volontaires, disponible dans notre laboratoire. Les participants ont reçu une compensation monétaire nominale pour leur participation et ils étaient tous naïfs quant aux objectifs de l'expérience.

Matériel. Les stimuli ont été présentés sur un écran d'ordinateur DELL de 17 pouces avec une résolution de 1024 x 768 pixels situé à 57 cm du participant et

l'expérience était contrôlée à l'aide d'un programme rédigé en Matlab (MathWorks, Natick, MA) et faisant usage de l'extension Psychophysics Toolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997). Les stimuli présentés étaient des lettres majuscules¹ de police Arial de 40 points, dont la hauteur était de 1 degré d'angle visuel. À l'aide du Signal Processing Toolbox pour MatLab (MathWorks, Natick, MA), une procédure de filtrage de type Butterworth a été appliquée aux stimuli pour manipuler leur contenu en fréquences spatiales. Le filtre passe-haut avait une coupure à 6,0 cycles/lettre pour ne laisser passer que les plus hautes fréquences. Le filtre passe-bas avait une coupure à 1,5 cycles/lettre pour ne laisser passer que les plus basses fréquences. Il y avait aussi un filtre mixte bloquant les fréquences situées entre 1,5 et 6,0 cycles/lettre. Une version non-dégradée (i.e. avec un filtre à large bande) de chaque stimulus a aussi été préparée. Les valeurs efficaces (RMS) pour le contraste des images étaient appariées à travers toutes les conditions.

Procédure. Au début de chaque essai, un point de fixation (un signe « + » en Arial, sous-tendant 0,6 degré d'angle visuel) apparaissait au centre de l'écran (500 ms ; ISI = 250 ms). Ensuite, une cible, accompagnée ou non de flaqueurs de part et d'autre de la cible, était présentée durant 150 ms (durée trop courte pour planifier et exécuter une saccade). Dans la condition où la cible était présentée en vision fovéale, le point de fixation disparaissait au même moment ; autrement, il demeurait visible jusqu'à la disparition des lettres. L'écran demeurait ensuite vide jusqu'à l'entrée sur le clavier de la réponse du participant par l'expérimentateur. L'intervalle inter-essais était de 500 ms.

¹ Les valeurs de confusabilité de lettres ne sont disponibles que pour des lettres majuscules.

Les participants recevaient comme instruction d'identifier la cible (soit la lettre du centre d'un trigramme lorsqu'il y avait des flanqueurs ; soit la lettre présentée seule) le plus rapidement possible en évitant de commettre une erreur, tout en maintenant leur regard sur le point de fixation. Une clé vocale enregistrait la latence. L'expérience comportait un total de 2304 essais pour chaque participant, c'est-à-dire 36 essais pour chacune de 64 conditions expérimentales. Ces 64 conditions expérimentales ont été établies en fonction de quatre facteurs intra-sujet : confusabilité des flanqueurs par rapport à la cible (deux niveaux : haute ; basse), distance verticale cible-flanqueurs (4 niveaux : 0,8x ; 1,0x ; 1,2x , et infinie; x correspondant à la hauteur de la lettre « x » ; la distance infinie correspondant à l'absence de flanqueurs, qui servait de niveau de base), filtrage de fréquences spatiales (4 niveaux : passe-haut ; passe-bas ; mixte ; large bande) et excentricité (2 niveaux : fovéa ; 1,25°). Il est à noter que les deux niveaux de confusabilité ont été établis selon des matrices de confusion de lettres établies par des études antérieures (Gilmore, Hersh, Caramazza, & Griffin, 1979; Loomis, 1982; Townsend, 1971; Van Der Heijden, Malhas, & Van Den Roovaart, 1984). Il est aussi à noter qu'avec une présentation périphérique (i.e. 1,25 deg d'excentricité), les stimuli étaient présentés soit en-dessous ou au-dessus du point de fixation, de manière aléatoire et contrebalancée à travers les essais. Pour chaque participant, l'expérience était divisée en trois séances expérimentales de 768 essais chacune, chacune comportant elle-même trois blocs de 256 essais chacun.

Résultats

Les temps de réponse aux essais corrects qui se situaient à plus de 2,5 écarts-types de la moyenne ont été éliminés. Il s'agit donc de 527 essais (1,9 % du total des essais) qui ne seront pas inclus dans l'analyse des données. La corrélation positive ($r = 0,89$, $p < 0,001$) entre les temps de réponse et les taux d'erreurs nous informe qu'il n'y a pas de compromis vitesse-précision. Le taux d'erreurs global est de 14,7%.

Temps de réponse

Les analyses des temps de réponse ont été effectuées sur les essais corrects à l'aide d'une ANOVA à mesures répétées avec un plan à quatre facteurs : Confusabilité (2 niveau : haute ; basse), Distance (4 niveaux : 0,8x ; 1,0x ; 1,2x ; infinie), Excentricité (2 niveaux : fovéa ; 1,25°) et Filtrage (4 niveaux ; passe-haut ; passe-bas ; mixte ; large bande). Les quatre effets principaux sont significatifs : Confusabilité ($F(1, 11) = 52,2$, $p < 0,001$), Distance ($F(3, 33) = 134,7$, $p < 0,001$), Excentricité ($F(1, 11) = 134,0$, $p < 0,001$) et Filtrage ($F(3, 33) = 61,7$, $p < 0,001$). Les temps de réponse sont plus grands avec haute confusabilité qu'avec basse confusabilité, ils diminuent avec l'augmentation de la distance entre les lettres (voir Tableau 1) et ils sont plus grands avec une stimulation périphérique qu'à la fovéa. Quant à l'effet principal du filtrage, le classement des conditions en ordre croissant des temps de réponse correspondants (avec différences significatives entre les conditions consécutives) est le suivant : large bande ($M = 412,9$;

$\acute{E}.T. = 10,5$), passe-haut ($M = 430,3$; $\acute{E}.T. = 10,5$), mixte ($M = 451,7$; $\acute{E}.T. = 10,0$) et passe-bas ($M = 507,3$; $\acute{E}.T. = 14,9$).

Tableau 1. Régressions linéaires des temps de réponse aux essais corrects en fonction de la distance entre les lettres.

	Intercept (ms)	Pente (ms/dist. (0,8° ; 1° ; 1,2° ; inf.))	R²
haute conf./périphérie	808,3	-103,8	0,99
haute conf./fovéa	470,3	-34,9	1,00
basse conf./périphérie	663,0	-68,5	0,99
basse conf./fovéa	459,8	-32,5	0,99
haute conf./passe-haut	596,4	-59,8	0,99
haute conf./passe-bas	746,0	-91,4	0,99
haute conf./mixte	636,3	-66,6	0,99
haute conf./large bande	566,1	-52,3	1,00
basse conf./passe-haut	514,4	-40,3	0,97
basse conf./passe-bas	699,0	-80,8	0,99
basse conf./mixte	542,1	-43,4	0,94
basse conf./large bande	490,2	-37,5	0,99

Plusieurs interactions à deux facteurs sont significatives : Confusabilité x Distance ($F(3, 33) = 26,4$, $p < 0,001$), Confusabilité x Excentricité ($F(1, 11) = 38,5$, $p < 0,001$), Distance x Filtrage ($F(9, 99) = 20,8$, $p < 0,001$), Distance x Excentricité ($F(3, 33) = 38,5$, $p < 0,001$) et Excentricité x Filtrage ($F(3, 33) = 3,0$, $p < 0,05$). Deux interactions à trois facteurs sont également significatives : Confusabilité x Distance x Excentricité ($F(3, 33) = 18,1$, $p < 0,001$) et Confusabilité x Distance x Filtrage ($F(9, 99) = 3,8$, $p < 0,001$). L'interaction impliquant les quatre facteurs étudiés ici n'était pas significative ($F(9, 99) = 0,985$, n.s.), des analyses d'effets simples ont donc été effectuées afin d'examiner en détail chacune des interactions triples.

L'interaction significative Confusabilité x Distance x Excentricité a été décomposée de façon à examiner les effets simples de la Distance et de l'Excentricité en fonction de la Confusabilité. L'interaction Distance x Excentricité est significative pour les essais à haute confusabilité ($F(3, 33) = 35,5$, $p < 0,001$) ainsi que pour les essais à basse confusabilité ($F(3, 33) = 33,4$, $p < 0,001$). Dans ces deux conditions, l'interaction démontre que l'effet linéaire de la distance sur les temps de réponse (augmentation des temps réponse avec diminution de la distance), est plus grand pour les essais en périphérie que pour ceux en fovéa (voir Figure 1). La modulation significative de l'interaction Distance x Excentricité par la confusabilité de lettres prend la forme d'une amplification de cette interaction avec les flanqueurs de haute confusabilité (voir Figure 1), tel que prédit par nos hypothèses (voir la section Hypothèses).

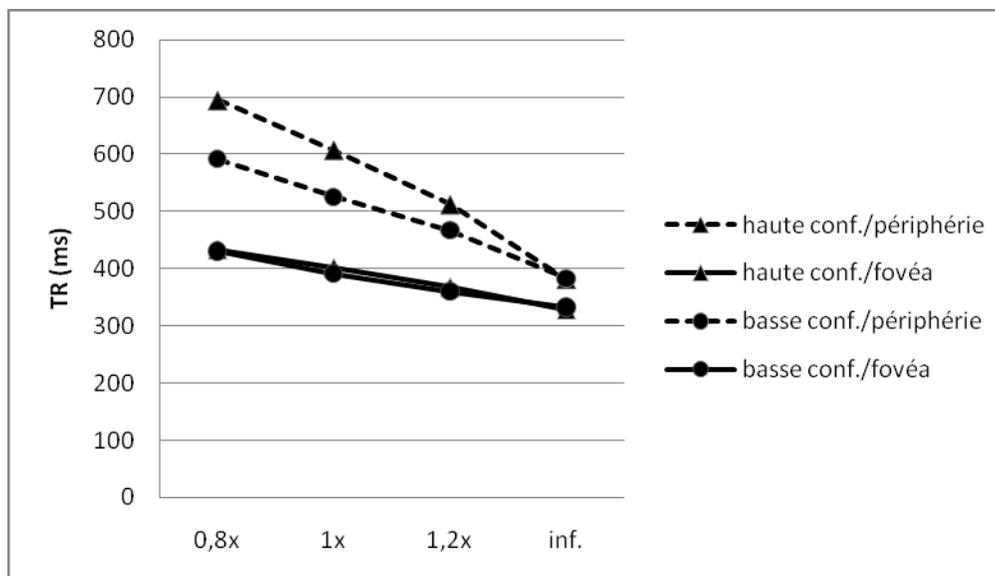


Figure 1. Temps de réponse en fonction de la distance entre les lettres pour les deux niveaux de confusabilité et les deux niveaux d'excentricité

L'interaction significative Confusabilité x Distance x Filtrage a été décomposée de façon à examiner les effets simples de la Confusabilité et de la Distance en fonction du Filtrage. L'interaction Confusabilité x Distance est significative pour les quatre types de Filtrage : passe-bas ($F(3, 33) = 5,4, p < 0,05$), mixte ($F(3, 33) = 12,2, p < 0,001$), passe-haut ($F(3, 33) = 11,5, p < 0,001$) et large bande ($F(3, 33) = 20,2, p < 0,001$). Dans ces quatre conditions, l'interaction significative démontre que l'effet de la distance sur les temps de réponse est plus grand pour les essais avec une haute confusabilité cible-flanqueurs que pour ceux avec une basse confusabilité (voir Figure 2). Cependant, la modulation de l'effet de la distance par la confusabilité n'est pas la même pour tous les types de filtres. En effet, nous pouvons constater par leurs pentes de régression respectives (Tableau 1), que l'effet est plus important pour le filtre passe-bas, suivi du filtre mixte, puis du filtre passe-haut et finalement, du filtre à large bande.

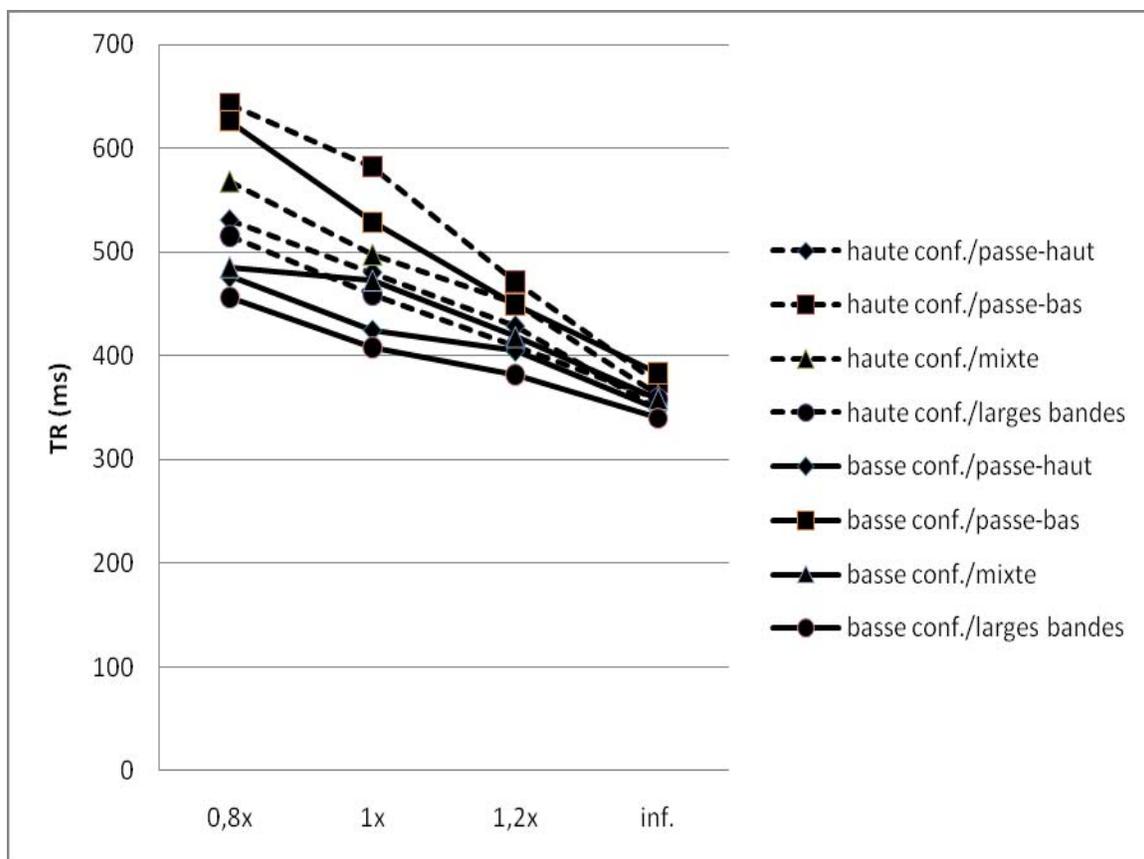


Figure 2. Temps de réponse en fonction de la distance entre les lettres pour les deux niveaux de confusabilité et les quatre types de filtrage.

Taux d'erreurs

Les analyses des taux d'erreurs ont également été effectuées à l'aide d'une ANOVA à mesures répétées selon le même plan factoriel que pour les temps de réponses. Les quatre effets principaux sont significatifs : Confusabilité ($F(1, 11) = 15,9, p < 0,05$), Distance ($F(3, 33) = 569,3, p < 0,001$), Excentricité ($F(1, 11) = 151,9, p < 0,001$) et Filtrage ($F(3, 33) = 355,2, p < 0,001$). Il y a plus d'erreurs avec haute confusabilité qu'avec basse confusabilité, elles diminuent avec l'augmentation de la distance entre les

lettres (voir Tableau 2) et elles sont plus nombreuses pour les essais en périphérie que pour ceux en fovéa.

Tableau 2. Régressions linéaires des taux d'erreurs en fonction de la distance entre les lettres.

	<u>Périphérie</u>			<u>Fovéa</u>		
	Intercept (%erreurs)	Pente (%erreurs/ dist. (0,8° ; 1°; 1,2° ; inf.))	R ²	Intercept (%erreurs)	Pente (%erreurs/ dist. (0,8° ; 1°; 1,2° ; inf.))	R ²
haute conf./passe-haut	0,469	-0,12	0,97	0,056	-0,01	0,82
haute conf./passe-bas	0,954	-0,22	0,97	0,569	-0,14	0,86
haute conf./mixte	0,674	-0,16	0,96	0,068	-0,02	0,74
haute conf./large bande	0,420	-0,11	0,99	0,041	-0,01	0,56
basse conf./passe-haut	0,239	-0,06	0,88	0,108	-0,03	0,71
basse conf./passe-bas	0,939	-0,22	0,97	0,765	-0,20	0,89
basse conf./mixte	0,466	-0,12	0,97	0,029	0,00	0,55
basse conf./large bande	0,293	-0,08	0,76	0,066	-0,02	0,73

Comme pour les temps de réponses, l'effet principal du filtrage sur les taux d'erreurs présente un classement des conditions selon l'ordre croissant suivant (avec différence significative entre les conditions consécutives, à l'exception de la différence entre le filtre à large bande et le filtre passe-haut) : filtre à large bande ($M = 0,07$; $\dot{E}.T. =$

0,008), suivit du filtre passe-haut ($M = 0,08$; $\acute{E}.T. = 0,004$), puis de filtre mixte ($M = 0,12$; $\acute{E}.T. = 0,008$) et finalement du filtre passe-bas ($M = 0,32$; $\acute{E}.T. = 0,009$).

À l'exception de l'interaction Confusabilité x Excentricité x Filtrage, toutes les interactions à deux et à trois facteurs sont significatives : Confusabilité x Distance ($F(3, 33) = 10,4$, $p < 0,001$), Confusabilité x Excentricité ($F(1, 11) = 42,8$, $p < 0,001$), Confusabilité x Filtrage ($F(3, 33) = 7,9$, $p < 0,001$), Confusabilité x Distance x Excentricité ($F(3, 33) = 13,5$, $p < 0,001$), Confusabilité x Distance x Filtrage ($F(9, 99) = 10,1$, $p < 0,001$), Distance x Excentricité x Filtrage ($F(9, 99) = 11,7$, $p < 0,001$), Distance x Filtrage ($F(9, 99) = 91,7$, $p < 0,001$), Distance x Excentricité ($F(3, 33) = 121,4$, $p < 0,001$) et Excentricité x Filtrage ($F(3, 33) = 22,7$, $p < 0,05$). L'interaction à quatre facteurs est également significative : Confusabilité x Distance x Excentricité x Filtrage ($F(9, 99) = 11,7$, $p < 0,001$). Cette interaction à quatre facteurs a été décomposée de façon à examiner tout d'abord les effets de l'interaction Confusabilité x Distance x Filtrage séparément pour les deux niveaux d'excentricité.

Pour les essais avec présentation en périphérie, l'interaction Confusabilité x Distance x Filtrage est significative ($F(9, 99) = 4,4$, $p < 0,001$). Toujours pour les essais avec présentation en périphérie, l'interaction Confusabilité x Distance n'est pas significative pour les essais avec le filtre passe-haut ($F(3, 33) = 2,4$, n.s.), ce qui suggère qu'avec ce type de filtre l'effet de la distance est invariant selon que la confusabilité soit haute ou basse. Par contre, cette interaction Confusabilité x Distance est significative pour les essais avec le filtre passe-bas ($F(3, 33) = 7,9$, $p < 0,001$), les essais avec le filtre

mixte ($F(3, 33) = 7,6, p < 0,001$) ainsi que les essais avec le filtre à large bande ($F(3, 33) = 7,8, p < 0,001$). Dans ces trois dernières conditions, l'interaction significative démontre que l'effet de la distance sur les taux d'erreurs est plus grand pour les essais avec haute confusabilité cible-flanqueurs que pour ceux avec basse confusabilité (Figure 3).

Cependant, l'impact de la confusabilité sur l'effet de la distance n'est pas le même pour tous les types de filtres. En effet, nous pouvons constater par les leurs pentes de régression respectives (Tableau 2), que l'effet est plus important pour le filtre passe-bas, suivi du filtre mixte, puis du filtre à large bande.

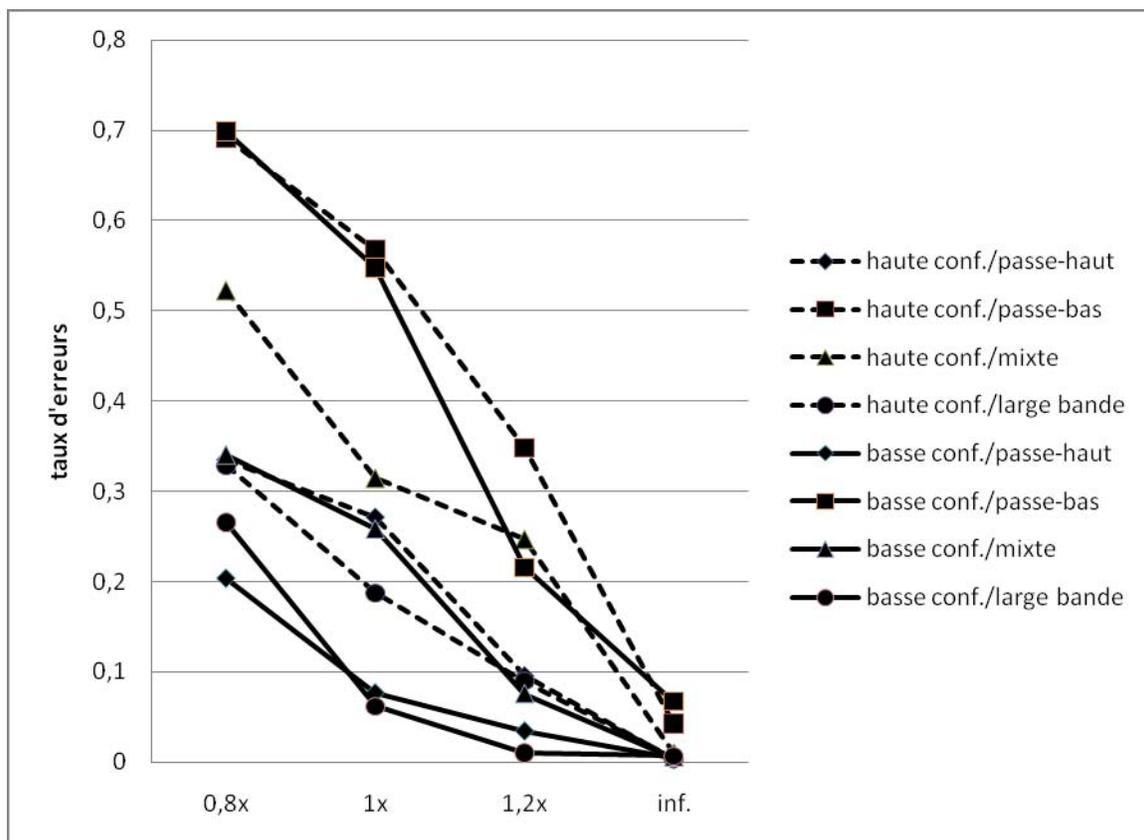


Figure 3. Taux d'erreurs en fonction de la distance entre les lettres pour les deux niveaux de confusabilité et les quatre types de filtrage lors des essais en périphérie.

Pour les essais avec présentation en fovéa, l'interaction Confusabilité x Distance x Filtrage est également significative ($F(9, 99) = 16,3, p < 0,001$). Toujours pour les essais avec présentation en fovéa, l'interaction Confusabilité x Distance n'est pas significative pour les essais avec le filtre à large bande ($F(3, 33) = 2,8, n.s.$), mais elle l'est pour les essais avec le filtre passe-haut ($F(3, 33) = 12,0, p < 0,001$), les essais avec le filtre passe-bas ($F(3, 33) = 25,8, p < 0,001$) ainsi que les essais avec le filtre hybride ($F(3, 33) = 4,7, p < 0,05$). Étonnement, pour les essais avec le filtre passe-haut, cette interaction significative démontre que l'effet de la distance sur les taux d'erreurs est plus grand pour les essais avec basse confusabilité cible-flanqueurs que pour ceux avec haute confusabilité, alors que pour les essais avec le filtre passe-bas et ceux avec le filtre mixte, les taux d'erreurs varient de façon irrégulière en fonction de la distance (Figure 4). En effet, tel que nous pouvons le constater par les courbes respectives, dans la condition passe-bas l'effet de distance est de très grande amplitude : l'interaction Distance x Confusabilité est particulièrement attribuable à l'absence d'augmentation des erreurs entre 0,8x et 1x pour les essais à haute confusabilité, alors que cette augmentation est présente pour les essais à basse confusabilité. Pour ce qu'il en est des filtres à large bande, passe-haut et mixte, on constate un léger effet de distance qui se caractérise particulièrement par une augmentation des taux d'erreurs avec la distance la plus faible. Une exception cependant concerne la condition basse confusabilité/filtre mixte où cette augmentation des taux d'erreur à 0,8x vs 1.0x n'apparaît pas.

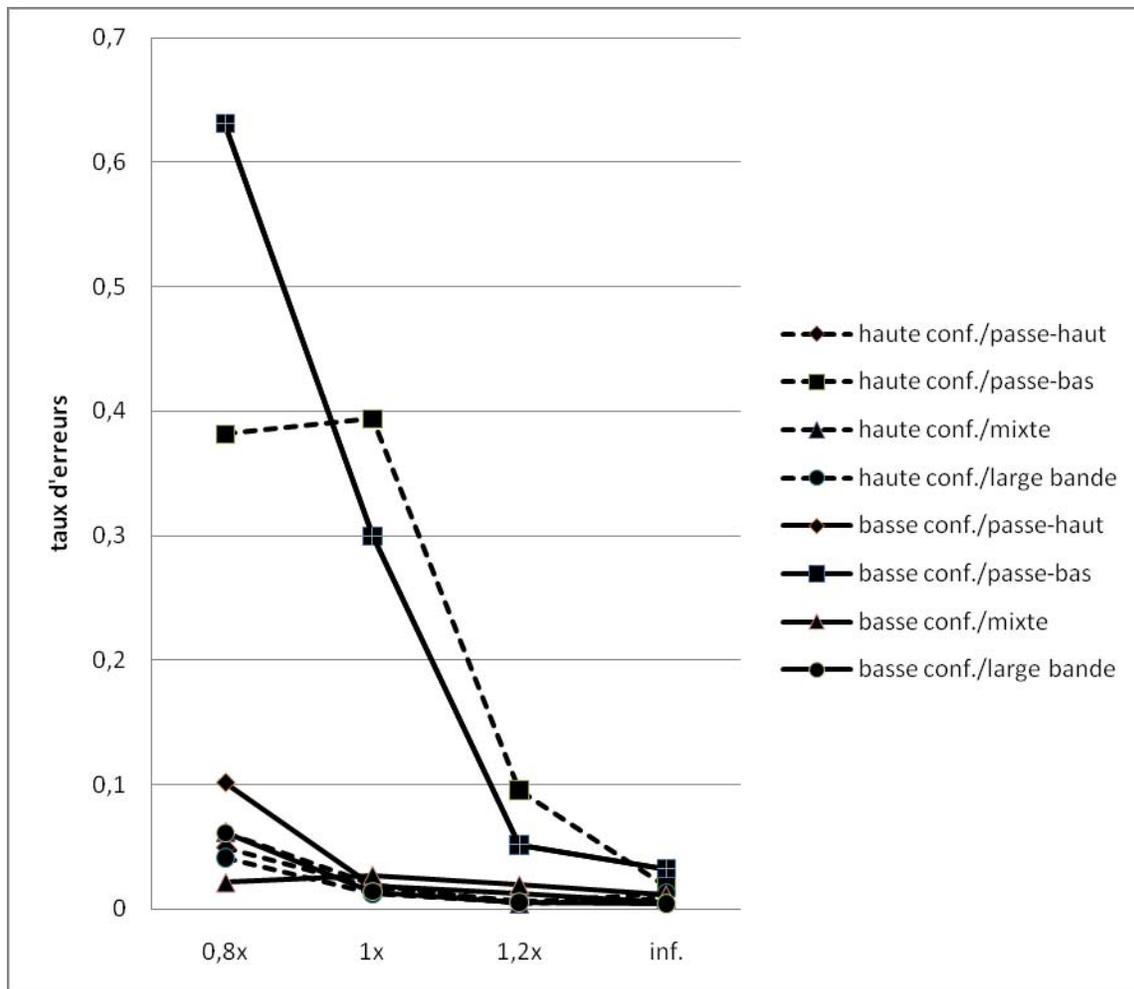


Figure 4. Taux d'erreurs en fonction de la distance entre les lettres pour les deux niveaux de confusabilité et les quatre types de filtrage lors des essais en fovéa.

Discussion

La tâche d'identification de lettres a tout d'abord permis de répliquer les impacts connus de distance et d'excentricité sur l'effet d'encombrement. En effet, le fait de rapprocher les flanqueurs de la lettre cible tout comme le fait d'éloigner celle-ci du point de fixation, amoindrit les performances d'identification. Nous constatons également une interaction entre ces deux facteurs, à savoir que l'effet de la distance cible-flanqueurs est plus important en périphérie qu'en fovéa.

De plus, cette interaction est amplifiée par la haute confusabilité. Ceci est en accord avec les données pilotes obtenues dans notre laboratoire, tel que décrit en introduction. Le fait que le partage d'attributs entre la cible et les flanqueurs amplifie l'effet d'encombrement est en accord avec les théories existantes mentionnées précédemment, comme quoi l'intégration excessive des attributs des flanqueurs, par des champs d'intégration trop grands en périphérie, interfère avec l'identification de la cible (Pelli et al., 2004). À la lumière du modèle explicatif de Levi (2008) qui propose un processus en deux étapes (*détection* d'attributs simples dans l'aire V1 suivie de leur *intégration* au delà de l'aire V1), nous pouvons postuler que lorsqu'ils sont dans un même champ d'intégration, les attributs similaires sont plus difficiles à distinguer les uns des autres que les attributs dissimilaires. Par contre, plus la cible a des attributs différents de ceux des flanqueurs, comme dans la condition de basse confusabilité dans le cas présent, plus il semble possible qu'un effet de saillance puisse aider à contrer l'effet d'encombrement. Cette possibilité a d'ailleurs été soulevée par Strasburger (2005). Celui-

ci propose que la saillance de la cible attire un champ d'intégration (qu'il qualifie aussi de champ d'attention) et que par conséquent, si la saillance est réduite (par les flanqueurs), le processus d'identification prend quand même place mais pas précisément au bon endroit dans le champ visuel. Les attributs des flanqueurs seraient donc traités comme appartenant à la cible. De leur côté, Kooi, Toet, Tripathy et Levi (1994) font aussi référence à l'effet de saillance et même à l'effet connu de « pop-out » en recherche visuelle, pour expliquer les résultats de leur étude examinant l'impact de la similarité sur l'effet d'encombrement. La tâche, qui consistait à identifier l'orientation d'une lettre T en périphérie entourée de quatre autres lettres T, a permis de démontrer que la dissimilarité cible-flanqueurs en terme de polarité de contraste, de profondeur ou d'orientation améliorait les performances d'identification.

L'impact de la confusabilité sur l'effet d'encombrement, démontré par la présente étude, concorde également avec d'autres modèles explicatifs qui traitent l'encombrement périphérique non pas comme une nuisance mais plutôt comme le reflet d'un processus efficient d'intégration visuelle. Greenwood, Bex et Dakin (2010) le décrivent comme un processus de régularisation qui simplifie le champ périphérique en faisant la promotion de la similarité perceptuelle entre des régions adjacentes. Dans leur étude, un « patch » de bruit blanc en périphérie et entouré de « Gabor patches » avec une certaine orientation, était perçu par les sujets comme ayant lui aussi cette orientation. Il est possible ici de faire un parallèle avec le phénomène de complétion perceptuelle (« filling-in »). De Weerd, Desimone et Ungerleider (1998) ont démontré que la réduction de saillance des attributs d'une figure, facilite la complétion par la texture du fond (i.e. réduction du

temps requis pour que survienne la complétion). Greenwood, Bex et Dakin (2010) ont d'ailleurs proposé que, bien que le temps d'occurrence de la complétion perceptuelle soit plus long que pour l'encombrement, les deux processus sont sûrement reliés étant donné leurs caractéristiques partagées (e.g. plus grande magnitude en périphérie et sélectivité à l'orientation).

Pour leur part, van den Berg, Roerdink et Cornelissen (2010) expliquent l'effet d'encombrement périphérique comme un épiphénomène de mécanismes visant à augmenter la réponse aux signaux d'orientation corrélés, de façon à mieux percevoir des stimuli écologiquement pertinents comme des contours. Dans un même ordre d'idée, Parkes, Lund, Angelucci, Solomom et Morgan (2001) ont démontré que malgré l'incapacité des sujets à rapporter l'orientation d'un seul "Gabor patch" en périphérie, ils pouvaient néanmoins correctement estimer l'orientation moyenne de l'ensemble des "Gabor patches". Les auteurs en ont conclu que les signaux locaux d'orientation sont combinés plutôt que perdus, à l'aide d'une transformation effectuée par le cerveau, décrite en tant que « compulsory averaging » (voir aussi Chong et Treisman, 2003, pour observations similaires). Parkes et al. (2001) proposent également que l'effet d'encombrement et la perception de textures sont les deux facettes d'un même mécanisme; l'encombrement ne serait que la façon de concevoir la perception de textures lorsque nous ne souhaitons pas qu'elle survienne.

Selon cette lignée d'explications, nous pouvons concevoir l'effet d'encombrement chez des personnes avec une vision normale comme l'effet secondaire d'un phénomène adaptatif. En effet, sans ce processus de simplification du champ périphérique, il serait probablement plus difficile de focaliser notre attention volontairement en vision fovéale. Nous aurions donc plus de risques d'être portés à distinguer chacun des autres éléments récurrents en périphérie, pourtant moins pertinents individuellement pour la tâche, comme ceux composant une texture. Par contre, tout dépendant des attributs distinctifs d'un stimulus périphérique relativement à la séquence de motifs qui l'entoure, il peut être juste assez saillant pour que nous puissions l'identifier ou au moins le détecter et ensuite déplacer nos yeux pour l'identifier. Dans le contexte évolutif de notre espèce, un exemple classique pour illustrer cette idée serait la perception d'un fruit rouge entouré de nombreuses feuilles vertes aux attributs similaires entre elles. Ceci suggère qu'au cours de l'évolution du système visuel primate, il a été utile d'être attentif à la saillance des éléments de notre champ périphérique si ceux-ci sont individuellement pertinents, tout en étant capable de simplifier notre perception du champ périphérique s'il y a récurrence d'attributs. Un fin équilibre se serait donc développé entre ces deux mécanismes.

Un aspect important de la présente étude consistait examiner le rôle joué par le contenu en fréquences spatiales des lettres dans l'effet d'encombrement. Autant pour les temps de réponses que pour les taux d'erreurs, nous constatons que le filtrage produit principalement l'effet suivant : une réduction des performances plus marquée avec le filtre passe-bas, suivit du filtre mixte, puis du filtre passe-haut et finalement du filtre à larges bandes. De façon plus spécifique, l'élimination des fréquences d'abord moyennes

et ensuite hautes résulte en une amplification de l'interaction Confusabilité x Distance pour les temps de réponses et en une amplification de l'interaction Confusabilité x Distance x Excentricité pour les taux d'erreurs. Trois conclusions peuvent être tirées de cette façon avec laquelle le filtrage affecte les performances. D'abord, le fait que le filtre mixte nuise moins aux performances que le filtre passe-bas suggère un effet protecteur de la part des hautes fréquences. Il y a donc plus d'information utile disponible avec le filtre mixte qu'avec le filtre passe-bas, bien que les fréquences moyennes (optimales) soient aussi manquantes. Nous pouvons aussi affirmer que le fait que le filtre passe-haut soit encore moins nuisible que les filtres mixtes et passe-bas suggère qu'à défaut de ne toujours pas avoir accès aux fréquences moyennes, les hautes fréquences sont plus informatives que les basses. Finalement, le fait que l'impact de la confusabilité sur l'effet de la distance soit plus important pour le filtre passe-bas concorde avec l'étude de D.Fiset et al. (2006) mentionnée précédemment, qui indique que les basses fréquences amplifient l'effet de confusabilité des lettres. Les lettres seraient donc perçues comme étant les plus similaires entre elles lorsque les basses fréquences spatiales seulement sont présentes (i.e. la condition avec le plus d'encombrement) et les moins similaires entre elles lorsque toutes les fréquences spatiales sont présentes (i.e. la condition avec le moins d'encombrement).

D.Fiset et al. (2008) ont démontré que les terminaisons de lettres de la police Arial constituent les attributs distinctifs les plus importants pour la tâche d'identification. Leur étude a également démontré que bien que l'omission des fréquences moyennes et hautes

n'empêchait pas le traitement efficient d'un attribut comme une courbe ouverte à droite (e.g. pour percevoir un C ou un G), toutes les fréquences spatiales, incluant les plus hautes, étaient nécessaires pour le traitement efficient des terminaisons (e.g. pour *distinguer* un C d'un G). Dans la présente étude, comme le filtrage passe-bas brouille les bordures des lettres et par conséquent leurs terminaisons, il est concevable que cela produise de l'incertitude chez l'observateur non seulement quant à la forme des différents attributs distinctifs de la lettre cible mais également quant à leur localisation précise dans le champ visuel. Cette incertitude est amplifiée lorsque les flanqueurs sont plus près de la cible et davantage s'ils ont des attributs très similaires aux siens, comme en haute confusabilité. En lien avec les modèles explicatifs déjà décrits, il s'agirait donc des fréquences spatiales les plus basses qui seraient les plus responsables de l'intégration des attributs de la cible et des flanqueurs comme un tout.

En lien avec la proposition de D.Fiset et al. (2006), comme quoi les patients avec dyslexie lettre-par-lettre ont perdu l'habileté à utiliser les fréquences spatiales qui sont les plus utiles chez le lecteur normal pour identifier des lettres, il serait intéressant dans une étude future d'examiner l'effet d'encombrement chez ces patients avec un protocole similaire à celui de la présente étude. Il est envisageable qu'avec leur biais pour les basses fréquences spatiales, ces patients subissent un effet d'encombrement fovéal similaire à l'encombrement périphérique des personnes sans trouble. Dans la présente étude, bien que les performances étaient moins bonnes en périphérie, il y avait quand même un effet en fovéa avec des lettres dégradées et ce, surtout avec le filtre passe-bas. Le cas échéant où les mécanismes de l'effet d'encombrement joueraient un rôle crucial

chez ces patients, il serait concevable que ces connaissances aident au développement d'outils technologiques permettant d'améliorer leur lecture (e.g. en éliminant les basses fréquences spatiales et en augmentant la distance entre les lettres).

Étant donné la nature neurologique de la dyslexie lettre-par-lettre, le locus cortical plutôt que rétinien de l'effet d'encombrement (Levi, 2008; voir aussi Liu, Jiang et Sun, 2009) et la plasticité neuronale, il serait également envisageable de développer une méthode de traitement permettant de réduire la sensibilité à l'effet d'encombrement chez ces patients. Une avenue prometteuse, selon des études récentes, consisterait en une sorte "d'entraînement" par jeux vidéo (voir Achtman, Green et Bavelier, 2008, pour une revue). Selon les résultats d'une étude de Green et Bavelier (2007), des personnes jouant régulièrement et depuis longtemps à des jeux vidéo d'action pouvaient tolérer des distances cibles-flanqueurs plus petites que les personnes du groupe contrôle. La tâche, similaire à celle Kooi et al. (1994) mentionnée plus haut, consistait à identifier l'orientation du « T » au milieu d'une série de trois « T » alignés à la verticale. En plus de ce lien corrélationnel, une relation causale a aussi été établie dans la même étude: après 30 heures d'entraînement sur 4 à 6 semaines, des "non-joueur de jeux vidéo d'action" avaient significativement réduit leur « seuil d'encombrement » (défini comme étant la plus petite distance cible-flanqueurs à laquelle la cible peut être correctement identifiée).

Bien entendu, nous ne pouvons pas encore savoir si une telle méthode s'appliquerait adéquatement et sans complication à des patients avec dyslexie lettre-par-

lettre. Plus d'études seront à entreprendre dans cette direction. Nous espérons toutefois que les résultats de la présente étude puissent offrir un meilleur éclairage sur la façon avec laquelle notre système visuel procède au traitement de lettres dans conditions non-optimales.

Références

Achtman, R.L., Green, C.S., & Bavelier, D. (2008). Video games as a tool to train visual skills. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 26, 435–446.

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

Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, 226, 177–178.

Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, 10, 433–436.

Chong, S.C. & Treisman, A. (2003). Representation of statistical properties. *Vision Research*, 43, 393–404

Chung S.T.L., Levi, D.M., & Legge, G.E. (2001). Spatial-frequency and contrast properties of crowding. *Vision Research*, 41, 1833–1850.

Chung, S. T. & Tjan, B. S. (2007). Shift in spatial scale in identifying crowded letters. *Vision Research*, 47, 437–51.

De Valois, R.L. & De Valois, K.K., (1988). *Spatial Vision*, Oxford University Press, New York

De Weerd, P., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (1998). Perceptual filling in: A parametric study. *Vision Research*, 38, 2721–2734.

Fiset, D., Arguin, M., Bub, D., Humphreys, G.W. & Riddoch, M.J. (2005). How to make the word length effect disappear in letter-by-letter dyslexia: Implications for an account of the disorder. *Psychological Science*, 16, 535–541.

Fiset, S., Arguin, M., & Fiset, D. (2006). An attempt to simulate letter-by-letter dyslexia in normal readers. *Brain and Language*, 98, 251–263.

Fiset, D., Gosselin, F., Blais, C. & Arguin, M. (2006). Inducing letter-by-letter dyslexia in normal readers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 1466–1476.

Fiset, D., Blais, C., Éthier-Majcher, C., Arguin, M., Bub, D., & Gosselin, F. (2008). Features for identification of uppercase and lowercase letters. *Psychological Science*, 19, 1161–1168.

Fiset, D., Blais, C., Arguin, M., Tadros, K., Éthier-Majcher, C., Bub, D., & Gosselin, F. (2009). The spatio-temporal dynamics of visual letter recognition. *Cognitive Neuropsychology*, 26, 23–35.

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

Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2001). Bubbles: A technique to reveal the use of information in recognition. *Vision Research*, 41, 2261–2271.

Grainger, J., Rey, A., & Dufau, S. (2008). Letter perception: from pixels to pandemonium. *Trends in Cognitive Sciences*, 12, 381–387.

Green, C.S., & Bavelier, D. (2007). Action-video-game experience alters the spatial resolution of vision. *Psychological Science*, 18, 88–94.

Greenwood, J. A., Bex, P.J., & Dakin, S.C.. (2010). Crowding changes appearance. *Current Biology*, 20, 496–501.

Hess, R. F., Dakin, S. C., & Kapoor, N. (2000). The foveal ‘crowding’ effect: Physics or physiology? *Vision Research*, 40, 365–370.

Huey, E.B. (1968). *The Psychology and Pedagogy of Reading*. M.I.T. Press (Cambridge, Mass.)

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, 255–279.

Levi, D. M. (2008). Crowding—An essential bottleneck for object recognition: A mini-review. *Vision Research*, 48, 635–654.

Liu T., Jiang Y., Sun X. & He S. (2009). Reduction of the crowding effect in spatially adjacent but cortically remote visual stimuli. *Current Biology*, 19, 127–132.

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

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

McDonald, S. A. (2006). Effects of number-of-letters on eye movements during reading are independent from effects of spatial word length. *Visual Cognition*, 13, 89–98.

Nandy, A. S., & Tjan, B. S. (2008). Efficient integration across spatial frequencies for letter identification in foveal and peripheral vision. *Journal of Vision*. 8, 1–20.

Parkes, L., Lund, J., Angelluci, A., Solomon, J. & Morgan, M.J. (2001). Compulsory averaging of crowded orientation signals in human vision. *Nature Neuroscience*, 4, 739–744.

Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10, 437–442.

Pelli, D. G., Farell, B., & Moore, D. C. (2003). The remarkable inefficiency of word recognition. *Nature*, 423, 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, 1136–1169.

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, 20, 1–36.

Pelli, D. G., & Tillman, K. A. (2008). The uncrowded window of object recognition. *Nature Neuroscience*, 11, 1129–1135.

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

Strasburger, H. (2005). Unfocused spatial attention underlies the crowding effect in indirect form vision. *Journal Of Vision*, 5, 1024–37.

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

van den Berg, R., Roerdink, J.B.T.M., & Cornelissen, F.W. (2010). A Neurophysiologically Plausible Population Code Model for Feature Integration Explains Visual Crowding. *PLoS Computational Biology*, 6, e1000646.

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