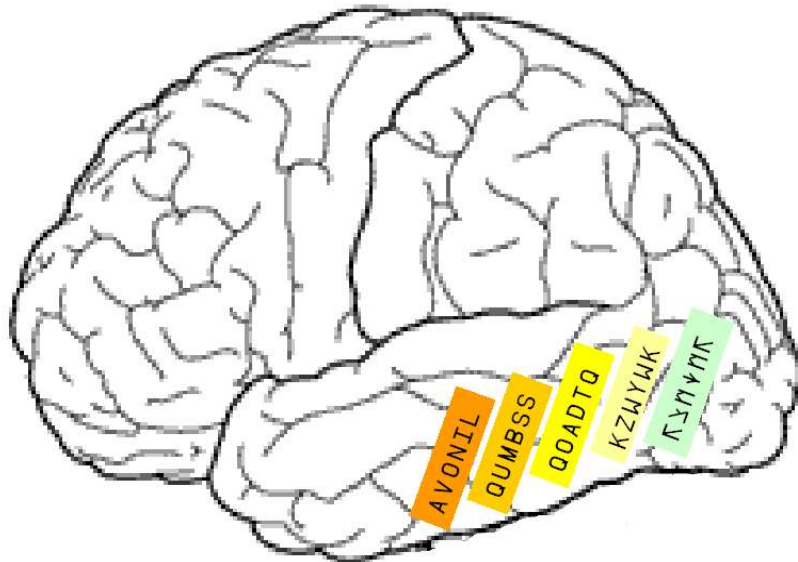


# "Quoi" et "Où" dans la lecture des mots:



Études en psychophysique,  
neuropsychologie et imagerie cérébrale  
fonctionnelle.

Mémoire de stage long du Master de sciences cognitives.

Fabien Vinckier

sous la direction du Professeur Laurent Cohen

Tuteur: Franck Ramus

Unité INSERM-CEA U562 dirigée par le Professeur Stanislas Dehaene

U562 Service Hospitalier Frédéric Joliot CEA | 4 pl. du Général Leclerc | Orsay, F91401 FRANCE

CHU Pitié-Salpêtrière - 91 Bd de l'Hôpital 75013 Paris

# Remerciements

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé, formé, encadré ou soutenu lors de ce travail et tout particulièrement :

Mon directeur de stage : Le professeur Laurent Cohen

Mon directeur de laboratoire : Le professeur Stanislas Dehaene

Mon tuteur, Franck Ramus

L'ensemble des membres de l'unité INSERM U562 qui m'ont accueilli, formé et encadré, dans la joie et l'allégresse, et en particulier :

Le Professeur Laurent Cohen

Le Professeur Stanislas Dehaene

Mariano Sigman

Le Docteur Lionel Naccache

Christophe Pallier

Antoinette Jobert

& Marie-Hélène Bajou

L'ensemble des membres, directeurs et enseignants du MASTER de sciences cognitives, et en particulier Alexia Chatirichivili pour son dévouement et sa capacité à maîtriser le chaos.

L'ensemble des membres, directeurs et enseignants de l'école de l'INSERM et en particulier :

Le Professeur Philippe Ascher

Le Professeur Jean-Claude Chottard

Anne-Marie Laffaye

Cécile Burban

Sylvie Boulet

Mon tuteur, le Professeur Jamel Chelly

Mes professeurs de médecine, pour m'avoir fait aimer la neurologie, la neuroanatomie, la neuropsychologie, les neurosciences et par conséquent les sciences cognitives. En particulier

Le Professeur Laurent Cohen

Le Docteur Lionel Naccache

Le Professeur Jean-Yves Delattre

Le Professeur Dominique Hasboun

Mes professeurs de MPSI, pour avoir essayé de m'enseigner la rigueur,

Le Professeur Rosa et le Professeur Gros, pour m'avoir conseillé dans mon parcours.

Jean-Philippe Dubus, Sébastien Levy, Olivier Meyrignac et Swan Pichon, pour avoir comblé nombre de mes lacunes techniques.

Mes parents, et mes amis pour m'avoir supporté, dans tous les sens du terme !

& bien sur, l'ensemble des sujets et patients ayant participé à ces expériences, pour m'avoir laissé les torturer pendant de longues heures.



# Sommaire :

## I Introduction

- A. Le recyclage neuronal
- B. Le problème de la reconnaissance des mots
- C. L'aire de la forme visuelle des mots

## II Contexte théorique

- A. le code neural des mots
- B. Le modèle LCD
  - 1. Principes
  - 2. Architecture générale
  - 3. Le rôle de l'apprentissage perceptif
  - 4. La généralisation par symétrie
  - 5. L'effet de longueur
  - 6. Prédications

## III Etudes

### A. Approches comportementales : Psychophysique

- 1. Introduction
- 2. Expérience 1
  - a. Matériel et méthodes
  - b. Résultats
  - c. Discussion
- 3. Expérience 2
  - a. Matériel et méthodes
  - b. Résultats
  - c. Discussion
- 4. Expérience 3
- 5. Expérience 4
  - a. Matériel et méthodes
  - b. Résultats
  - c. Discussion
- 6. Discussion générale

### B. Approche neuropsychologique

- 1. Introduction
- 2. Présentation du cas
- 3. Lecture écologique
- 4. Lecture de mots verticaux ou écrits en miroir
  - a. Matériel et Méthodes
  - b. Résultats

- c. Discussion
- 5. Lecture de mots restreints à un hémichamp visuel
  - a. Matériel et méthodes
  - b. Résultats
  - c. Discussion
- 6. Lecture de mots inclinés
  - a. Matériel et méthodes
  - b. Résultats
  - c. Discussion
- 7. Lecture de mots espacés
  - a. Matériel et méthodes
  - b. Résultats
  - c. Discussion
- 7. bis Réplication
  - a. Matériel et méthodes
  - b. Résultats
  - c. Discussion
- 8. Discussion générale sur l'effet de longueur
- 9. L'agnosie d'orientation
  - a. Matériel et méthodes
  - b. Résultats
  - c. Discussion

### C. Approche d'imagerie cérébrale fonctionnelle

- 1. Introduction
- 2. Description du paradigme
- 3. Matériel et méthodes
  - a. Phase 1
  - b. Phase 2
- 4. Prédications
  - a. Phase 1
  - b. Phase 2
  - c. Phase 3

## IV Discussion générale

## V Références

## VI Annexes

- 1. Anti effet de longueur dans l'expérience 2
  - a. Résultats
  - b. Discussion
  - c. Confirmation
- 2. Les différents groupes d'alexie
- 3. Détail de la génération des pseudo-mots
- 4. Polices utilisées.

Abbréviations utilisées:

VWFA aire de la forme visuelle des mots (*visual word form area*)

TEP Tomographie par émission de positons

IRMf Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

MEG Magnéto-encéphalographie

SOT sillon occipito-temporal

CGL corps genouillé latéral

TR temps de réaction

# I Introduction:

## A. Le recyclage neuronal

Comment reconnaissons-nous des mots écrits ? La lecture est une capacité culturelle d'origine récente. Les premières traces d'écritures connues ont environ 5400 ans. Cette durée, éminemment courte à l'échelle de l'évolution biologique a difficilement pu permettre l'apparition de mécanismes biologiques dédiés à l'apprentissage de la lecture. Un faisceau d'arguments multidisciplinaires souligne pourtant l'existence d'une spécialisation cérébrale pour cette fonction, et met en avant une grande reproductibilité dans les aires qui lui sont dédiées .

Pour résoudre cette apparente contradiction, des auteurs ont avancé que le développement de fonctions culturelles récentes spécifiquement humaines, comme la lecture, pourrait s'appuyer sur le recyclage de mécanismes plus anciens (Dehaene 2005). Dans cette hypothèse, l'apprentissage de ces fonctions ne reposerait pas sur des mécanismes spécifiquement dessinés pour elles, ni sur des mécanismes généraux complètement plastiques capables de tous les types d'apprentissage, mais résulterait de la récupération, de l'invasion, bref, du recyclage de structures cérébrales dont l'architecture serait particulièrement adaptée à la résolution du type de problème posé par ces fonctions. Réciproquement, une fonction culturelle ne pourrait se développer chez l'homme que dans la mesure où le type de problème qu'elle pose peut être résolu par des structures préexistantes moyennant un minimum de recyclage. En d'autres mots, l'éventail des fonctions culturelles humaines possibles est hautement et biologiquement contraint par une architecture cérébrale préfixée.

Dans le cas de la lecture, cette construction pourrait s'appuyer sur le système du langage, et sur une propriété de l'ensemble des langages humains : la segmentation. Un énoncé dans une langue humaine se découpe en phrases, elles-mêmes constituées de mots, qui peuvent être découpés en syllabes, puis en phonèmes. Cette discrétisation de l'information est un pré-requis au type de code utilisé dans l'écriture, et par conséquent au type de structures cérébrales nécessaire à la lecture.

L'autre grand système général sur lequel peut s'appuyer la lecture est la vision et en particulier la reconnaissance des objets. Dans la suite, nous nous concentrerons sur le type de problème que soulève l'analyse visuelle d'un mot isolé et sur les mécanismes pouvant permettre de les résoudre dans le contexte neurophysiologique d'un recyclage neuronal.

## B. Le problème de la reconnaissance des mots.

De manière générale, on demande à un système de reconnaissance d'objets d'être capable d'associer à des images rétiniennes très différentes un même objet, c'est à dire d'être invariant pour un certain nombre de paramètres. Ainsi une chaise reste une chaise (et même *cette* chaise) à travers un grand nombre de positions, d'orientations ou de tailles différentes sur la rétine.

De même, l'analyse visuelle d'un mot consiste à accéder rapidement à une représentation abstraite de ses lettres ordonnées, connue sous le nom de forme visuelle du mot, indépendamment de leur CASSE, de leur <sup>position</sup> spatiale, de leur <sub>taille</sub>, de leur couleur ou de la police utilisée (Warrington & Shallice, 1980). Ce calcul de la «forme visuelle du mot», véritable frontière entre un ensemble de représentations visuelles, et un ensemble de connaissances sur le mot, incluant sa phonologie et sa sémantique, nécessite de négliger des différences importantes au niveau rétinien (ex. a et A correspondent au même objet), tout en prêtant attention à des détails extrêmement fins (e.g. e et c correspondent à des objets différents). L'ordre des lettres (c'est à dire leur position relative) doit être encodé, afin de discriminer des anagrammes, mais ce code doit être invariant pour la position absolue des lettres, afin d'identifier un même mot à différentes positions du champ visuel.

Enfin, le type de différences à prendre en compte dépend éminemment de l'alphabet. Ainsi un lecteur français ne notera peut-être pas la différence entre un ן et un ן, qui constituent pourtant des lettres différentes en hébreu.

## C. L'aire de la forme visuelle des mots

La lecture, même d'un mot isolé, active un large réseau cortical bilatéral. Ce réseau inclut notamment des aires impliquées dans le langage ou classiquement dédiées au traitement visuel. Au sein de ce réseau, de nombreuses études ont permis de mettre en évidence une aire qui semble spécialisée dans le traitement visuel des mots écrits. C'est au sein de cette aire, située dans le sillon occipito temporal gauche, que pourrait être calculée la forme visuelle des mots décrite précédemment. Aussi, cette aire a été nommée l'aire de la forme visuelle des mots (VWFA).

Des études en TEP ou en IRMf ont montré des activations de cette région lors de présentation consciente (Beauregard et al., 1997; Brunswick, McCrory, Price, Frith, & Frith, 1999; Dehaene, Le Clec'H, Poline, Le Bihan, & Cohen, 2002; Fiez, Balota, Raichle, & Petersen, 1999; Paulesu et al., 2000; Wagner et al., 1998) mais aussi lors de présentation subliminale masquée de mots (Dehaene



& al, 1998; Dehaene & al 2001). La VWFA est aussi particulièrement activée lorsque l'on contraste les activités générées par des mots et celles générées par d'autres stimuli, comme des damiers, des visages ou d'autres objets (Gauthier et al., 2000; Hasson et al., 2002; Puce, Allison, Asgari, Gore, & McCarthy, 1996). La VWFA fait preuve d'une invariance spatiale, puisqu'elle est activée par une présentation de mots dans l'hémichamp visuel gauche comme dans l'hémichamp visuel droit (Cohen et al 2000). De plus, la possibilité de mettre en évidence cette aire au niveau individuel a pu mettre en évidence une grande reproductibilité dans ses coordonnées (pic d'activation à -43, -54, -12 dans le référentiel de Talairach) avec moins d'1 cm d'erreur standard. (Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002; Dehaene et al., 2002; Gauthier et al., 2000; Puce et al., 1996). Dans ces études, presque tous les sujets montraient une activation à gauche tandis que seuls quelques sujets montraient en plus une activité, quoique moins forte, à droite. Point important, des études en MEG ont permis de montrer que cette aire semble être la source de la dépolarisation enregistrée 150 à 200ms après la présentation d'un mot. (Allison, McCarthy, Nobre, Puce, & Belger, 1994; Allison et al., 1999; Cohen et al., 2000; Marinkovic et al., 2003; A. C. Nobre, Allison, & McCarthy, 1994; Pammer et al., 2004; Salmelin, Service, Kiesilä, Uutela, & Salonen, 1996; Simos et al., 2002; Tarkiainen, Helenius, Hansen, Cornelissen, & Salmelin, 1999)

Le rôle causal dans la lecture de la VWFA est bien mis en évidence par l'un des syndromes les plus purs et les plus marquants de la neuropsychologie, l'alexie pure. Ce syndrome a été décrit par Déjerine en 1892 et rapporté à une lésion du cortex occipito-temporal gauche (Déjerine, 1892). Les patients souffrant d'alexie pure souffrent d'altération des capacités de lecture, en dissociation avec une conservation de la compréhension orale ainsi que de la capacité d'écriture, spontanément ou sur dictée (Damasio, 1983). Si certains de ces patients montrent parfois des troubles de la reconnaissance d'autres types de stimuli, le déficit reste essentiellement spécifique, montrant même souvent une dissociation entre le traitement des nombres et le traitement des lettres (Warrington, E. K., & Shallice, T. 1980, Patterson & Key, 1982.). Ce syndrome peut se retrouver sous des formes plus ou moins marquées (Berhman & al 1998, Hanley et Kay, 1996). Ainsi, le patient de Déjerine, ou d'autres cas plus récents de la littérature (Dalmas and Dansilio, 2000; Dejerine, 1892) souffraient d'une alexie dite globale, puisqu'il était incapable de reconnaître la moindre lettre, tandis que dans la majorité des cas, les patients alexiques montrent une capacité de reconnaissance des lettres relativement préservée (Montant, M., & Behrmann, M. 2000, Cohen et al 2003). Ces patients peuvent alors développer des stratégies de lecture compensatrices, connues sous le nom de lecture lettre à lettre. De manière cruciale le recoupement de lésions ayant provoqué une alexie pure, par opposition à des lésions occipito-temporales n'affectant pas la lecture, a pu délimiter une zone critique dans l'apparition de ce syndrome (Damasio et Damasio 1983, Binder and Mohr 1992, Cohen et al., 2003). Bien que sensiblement plus étendue que la VWFA proprement dite, cette zone

critique corrèle bien avec la région mise en évidence par l'imagerie fonctionnelle et l'inclut intégralement. En outre, l'alexie pure peut être provoquée d'une part par une lésion directe de la VWFA, et d'autre part par sa déafférentation ou sa déafférentation fonctionnelle. Ainsi, une lésion calleuse postérieure prévient le transfert d'information entre les deux hémisphères, et induit une alexie restreinte à l'hémichamp visuel gauche (Suzuki et al, 1998). La différence entre la région de cortex mise en évidence par l'imagerie fonctionnelle, et la région cérébrale qui, lorsqu'elle est lésée, induit une alexie pure, pourrait être expliquée par les alexies dues à une telle déafférentation.

Enfin, la VWFA montre des signes de spécialisation fonctionnelle. La VWFA est ainsi plus activée lors de la présentation de vraies lettres que lors de la présentation de fausses lettres (Petersen 1990; Price 1996). Plus étonnant, alors que la VWFA ne montre pas de différence d'activation entre sa réponse à la présentation de mots et la présentation de pseudo-mots prononçables, les vrais mots (ou les pseudo-mots) l'activent plus que des chaînes de caractères violant les propriétés orthographiques de la langue, comme des chaînes de consonnes (Beauregard et al., 1997; Büchel et al., 1998; Cohen et al., 2002; Price et al., 1996; Rees, Russell, Frith, & Driver, 1999; Xu et al., 2001). Du fait du caractère arbitraire de ces règles orthographiques, cette propriété montre encore une fois une spécialisation fonctionnelle acquise de cette zone. Enfin la VWFA montre des propriétés d'invariance spécifiques à la lecture. Ainsi, des mots en casse alternée (e.g. CeRvEaU) activent autant la VWFA que des mots normaux (Polk & Farah, 2002). De plus, on peut montrer que la VWFA contient des neurones invariants pour la casse. Deux occurrences successives d'un même mot activent moins la VWFA que deux mots différents : Un phénomène connu sous le nom de répétition suppression. Or, au niveau de la VWFA, cette répétition suppression est aussi forte si ces deux occurrences du même mot sont présentées dans la même casse ou si l'on change de casse entre les deux. (e.g. Lorsque 'TABLE' ou 'table' précède 'TABLE', la VWFA présente le même niveau d'activation. Ce niveau est inférieur à celui généré lorsque 'LAMPE' précède 'TABLE'). Cette invariance par casse est présente même si le premier des deux mots est présenté de manière subliminale et n'est donc pas perçu consciemment pas le sujet (Dehaene et al., 2001). Ce résultat a été répliqué récemment en utilisant des mots exclusivement constitués de lettres prenant des formes très différentes selon la casse (e.g. RAGE , rage), et qui ne sont donc reliés qu'à travers une convention culturelle purement arbitraire.(Dehaene et al., 2004). Ces résultats montrent que le traitement au niveau de la VFVA va au-delà d'une simple normalisation pour la taille ou la position, commune à l'ensemble des stimuli visuels. Au contraire, ce traitement est capable d'établir des liens, de réaliser une invariance pour des paramètres culturels spécifiques à la lecture. Ces données montrent donc que la VWFA, durant l'acquisition de la lecture, réalise un apprentissage perceptuel spécifique, de façon à progressivement internaliser des propriétés spécifiques d'un alphabet et d'un langage écrit donné. En d'autres mots, la VWFA semble donc bien spécialisée dans le calcul de la

forme visuelle des mots.

## II Contexte théorique

### A. Le code neural des mots

Comprendre le code cérébral des mots écrits est devenu un thème actif dans le domaine des sciences cognitives, tant sur le plan expérimental (Davis & Bowers, 2004; Humphreys, Evett, & Quinlan, 1990; Peressotti & Grainger, 1999; Schoonbaert & Grainger, 2004; Whitney & Lavidor, 2004) que sur le plan théorique (Grainger & Whitney, 2004; Whitney, 2001). Mais si de nombreux modèles connexionnistes de la lecture ont été proposés, la plupart se sont concentrés sur l'interaction entre l'orthographe, la phonologie et la sémantique, en ignorant le problème initial de la reconnaissance visuelle du mot. Ainsi, le plus souvent, ces modèles assument l'existence a priori d'une représentation invariante pour la casse et la position. De plus, leur démarche se fonde plus sur une approche purement computationnelle que sur la base de données neurophysiologiques.

Une idée simple consiste par exemple à assigner à chaque lettre sa position dans le mot, à travers une matrice de détecteurs de lettres invariants pour la casse, répliqués à chaque position spatiale possible (e.g. CHAT serait encodé par C en case 1, H en case 2, A en case 3 et T en case 4). Cette idée d'un encodage par case (slot-coding), utilisée dans de nombreux modèles (Ans, Carbonnel, & Valdois, 1998; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001; Grainger & Jacobs, 1996; Harm & Seidenberg, 1999; McClelland & Rumelhart, 1981; Zorzi, Houghton, & Butterworth, 1998), suppose le mot aligné dans un certain référentiel. L'origine de ce référentiel a fait l'objet de nombreuses propositions: sur la première lettre (Coltheart et al., 2001), la première voyelle (Zorzi et al., 1998) ou encore la position préférée dans le mot (Ans et al., 1998). Pourtant, dans tous ces modèles, une légère transformation du mot (comme l'insertion d'une lettre en début de mot) suffit le plus souvent à briser l'ensemble du code. La similarité de chaînes présentant des permutations de lettres (ex SUCRE SUCER), des séquences communes (GALA REGAL) ou des morphèmes communs (eg. VOIR REVOIR) peut difficilement être expliquée dans ce type d'encodage, si ces chaînes ne sont pas préalablement convenablement alignées.

Rendre compte de ce type de similarité nécessite d'encoder la position relative des lettres plutôt que leur position absolue. Ainsi certains modèles ont avancé un encodage par triplet de lettres (wickelcoding). (Johnson & Pugh, 1994; Mozer, 1987; Plaut, McClelland, Seidenberg, & Patterson, 1996; Seidenberg & McClelland, 1989). Le mot « CHIEN » serait ainsi encodé par ses trigrammes #CH, CHI, IEN et EN#. Cependant, cet encodage ne permet pas d'expliquer la similarité de certains

mots qui ne présentent pas de triplets communs, comme PAR et PUR. Ce problème peut être contourné en utilisant des unités plus flexibles de type P \_ R, qui répondent quelle que soit la lettre centrale. (Mozer , 1987). Le modèle de Mozer ( Mozer 1987), bien qu'il ne prenne pas en compte l'invariance par casse, décrit ainsi une hiérarchie de processus permettant d'extraire une représentation des mots invariante pour la position.

De manière assez proche, Grainger et Whitney (Grainger & Whitney, 2004 )ont proposé le concept de bigrammes ouverts, en supposant que les mots sont encodés par une liste de ses paires de lettres ordonnées, non nécessairement contiguës. Par exemple, un détecteur de bigramme ouvert S-N réagira à la présence d'un S à la gauche d'un N à n'importe quelle position rétinienne, même si quelques lettres les séparent. EAU serait encodé par #E, #A, #U, EA, EU, E#, AU, A#, U#. Ce modèle permet d'expliquer pourquoi le processus de traitement d'un mot peut être amorcé par un sous-ensemble ordonné de ses lettres. Par exemple MISN amorce le mot MAISON, mais pas MSIN (Grainger & Whitney, 2004). Dans cet exemple, la majorité des paires de lettres consécutives sont cassées mais les bigrammes ouverts, comme S-N, ne le sont pas. En revanche, cet encodage n'associe pas à chaque mot un code unique. 'ANNA' et 'NANA', par exemple, sont encodés par le même ensemble de bigrammes.

## **B. Le modèle LCD**

### **1. Principes**

Un faisceau d'arguments neuropsychologiques, psychologiques et de neuroimagerie convergent vers l'idée que le cerveau humain du normo-lecteur contient des mécanismes spécialisés pour la reconnaissance visuelle du mot, mécanismes sous-tendus de manière systématique par une région corticale reproductible située dans dans le sillon occipito-temporal gauche: l'aire de la forme visuelle du mot. L'hypothèse du recyclage neuronal peut-elle permettre de répondre au curieux paradoxe d'une aire corticale spécialisée dans une fonction d'origine culturelle récente ?

Nous spéculons que la capacité du cerveau humain à apprendre dérive du fait que le système visuel des autres primates accomplit déjà des opérations très proches de celles demandées dans la reconnaissance des mots, et possède assez de plasticité pour s'adapter à de nouveaux objets, comme les lettres ou les mots. Lors de cet apprentissage, une partie du cerveau humain devient hautement spécialisée dans la reconnaissance de formes arbitraires, ou dans des opérations comme l'invariance spatiale ou l'invariance par casse, car elle dispose de prédispositions à ce genre d'opérations. L'acquisition de la lecture résulte donc plus de la sélection et de l'adaptation d'une

région neurale en fonction de ses propriétés, que de la création *de novo* de nouvelles propriétés dans cette région. Si cette hypothèse est correcte, les mécanismes neuronaux impliqués dans la reconnaissance des objets chez le singe devraient toujours être à l'œuvre, moyennant un minimum d'adaptation, dans la reconnaissance des mots chez l'humain expert en lecture.

Quels sont les mécanismes et les propriétés du système visuel du primate qui paraissent essentiels pour l'acquisition de la lecture :

- 1- Organisation hiérarchique. : La voie visuelle ventrale est organisée selon une hiérarchie d'aires bilatéralement interconnectées. Il existe un gradient postéro-antérieur de la taille des champs récepteurs, qui semblent augmenter d'un facteur 2 ou trois à chaque étape. (Rolls 2000) Cette augmentation s'accompagne d'une augmentation parallèle de la complexité du pattern reconnu, depuis une simple barre orientée jusqu'à un objet entier. Enfin, l'invariance pour l'illumination, la taille ou la position augmente selon un même gradient.
- 2- Sélectivité pour la forme : Les colonnes du cortex inférotemporal forment une banque de détecteurs de formes élémentaires, incluant des formes proches de lettres simples comme le T ou le L, qui sont capables collectivement d'encoder et de représenter de nombreux objets (Tsunoda, Yamane, Nishizaki & Tanifuji, 2001). Cette sélectivité émergerait de la capacité des neurones à intégrer l'information de plusieurs neurones sélectifs de patterns plus élémentaires, et donc hiérarchiquement inférieurs, (Brincat & Connor, 2004). Ce mécanisme pourrait aussi rendre compte du développement de l'invariance spatiale, par intégration de l'information de plusieurs détecteurs locaux (Riesenhuber & Poggio, 1999; Rolls, 2000).
- 3- Plasticité et apprentissage perceptif : Les neurones du cortex inféro-temporal sont plastiques, et peuvent, via un entraînement, devenir spécifiques de n'importe quelle image (Logothetis & Pauls, 1995; Logothetis, Pauls, Bulthoff, & Poggio, 1994). Un même neurone peut devenir spécifique de plusieurs images arbitrairement associées, si elles sont associées au cours de présentations répétées (Miyashita, 1988). Ce mécanisme pourrait rendre compte de l'acquisition de plusieurs représentations différentes d'une même lettre (casse, police)
- 4- Biais d'échelle. Des études en IRMf ont permis de montrer que les régions les plus latérales du cortex occipito-temporal humain avaient une préférence pour les petits

objets fovéaux. (Malach et al., 2002) A l'inverse ces régions les plus médiales auraient un biais pour la périphérie du champ visuel. Ce biais du cortex occipito-temporal latéral pour les objets détaillés fovéaux, en association avec le biais des aires du langage pour l'hémisphère gauche, pourrait expliquer pourquoi les mots sont associés à une région latérale du cortex occipito-temporal gauche.

## 2- Architecture générale

Le modèle LCD tente de reprendre ces principes, ainsi que ceux développés par Mozer, Grainger et Whitney dans une description neuro-physiologiquement plausible du système occipito-temporal de reconnaissance des mots (Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. 2005). Ainsi que le représente la figure 1 il suggère l'existence d'une hiérarchie de neurones sensibles à des patterns de plus en plus abstraits dans un champ récepteur de plus en plus large. C'est à travers cette hiérarchie de détecteurs de combinaisons locales de formes que se construirait le système invariant de reconnaissance des mots.

Au niveau le plus bas, la combinaison de détecteurs de barres orientées forme des détecteurs locaux de fragments, qui ont déjà une légère tolérance au déplacement et au changement de taille. Au niveau suivant, la combinaison de fragments forme des détecteurs locaux de formes. Ces détecteurs peuvent reconnaître des lettres, mais uniquement dans une casse et une police donnée. Les détecteurs de la forme visuelle de la lettre (e.g. indépendamment de la police ou de la casse) peuvent se constituer à une étape ultérieure, par recombinaison d'une population de détecteurs de lettres spécifiques d'une casse. En raison de leur champ récepteur relativement restreint, ces détecteurs de lettres ont une tolérance modérée aux variations de taille ou de position. Ces détecteurs de lettres doivent donc être répliqués à de nombreuses positions, formant la banque de détecteurs de lettres invariant pour la casse, postulée dans de nombreux modèles.

Point critique, l'étape suivante n'est pas constituée de détecteurs complètement invariants pour la position, mais de détecteurs de combinaisons locales de lettres. Par exemple, un neurone pourrait répondre de manière optimale à un «N à un ou deux caractères à la gauche d'un A, à approximativement  $0.5^\circ$  à la droite de la fixation». Si l'augmentation de la taille de champ récepteur se fait d'un facteur 2 ou 3 à chaque étape, les neurones de ce niveau pourraient encoder de courtes séquences de 1, 2 ou 3 lettres. Cependant, un compromis doit être trouvé entre l'invariance, la sélectivité et l'information transmise. Un neurone encodant un triplet de lettres n'encoderait qu'une position donnée. Il n'encoderait donc qu'une faible quantité d'information, et ne

participerait qu'à la reconnaissance d'un faible nombre de mots. A l'inverse, un détecteur encodant une seule lettre serait fréquemment activé, mais non informatif sur la position relative des lettres les unes par rapport à une autre.

Un détecteur de bigramme reste sélectif tout en permettant un certain degré d'invariance spatiale. Un tel détecteur pourrait résulter de l'intégration de détecteurs de lettres partiellement superposés (fig 1), et constituerait un bon compromis entre la nécessité d'une invariance spatiale et l'encodage de l'ordre des lettres. Bien évidemment, une contribution de détecteurs de lettres ou de trigrammes ne peut être formellement exclue.

La structure du champ récepteur de ces détecteurs se construit en intégrant plusieurs détecteurs de lettres. Ils restent donc dans une certaine mesure locaux, et nécessitent d'être répliqués en de nombreux points du champ visuel mais garantissent un accroissement de l'invariance spatiale. Par conséquent, ces détecteurs tolèrent un certain degré d'imprécision dans la position des lettres, en permettant l'insertion d'une ou peut-être deux lettres entre les deux composants du bigramme (e.g. le détecteur du bigramme E-N répondrait bien sur au bigramme EN mais aussi à tous les trigrammes E \_ N).

En aval de ce niveau, l'étape naturelle réside dans la combinaison d'un certain nombre de bigrammes, pour constituer des détecteurs de courtes chaînes de lettres récurrentes, incluant des mots courts ou des morphèmes.

Cette architecture permet de conserver les propriétés désirables des bigrammes ouverts (Humphreys et al., 1990; Peressotti & Grainger, 1999; Perea & Lupker, 2003; Schoonbaert & Grainger, 2004), et une certaine flexibilité, tout en assignant à chaque mot un code unique (e.g. Il existe des bigrammes distincts entre ANNA et NANA), et en étant plausible sur le plan biologique.

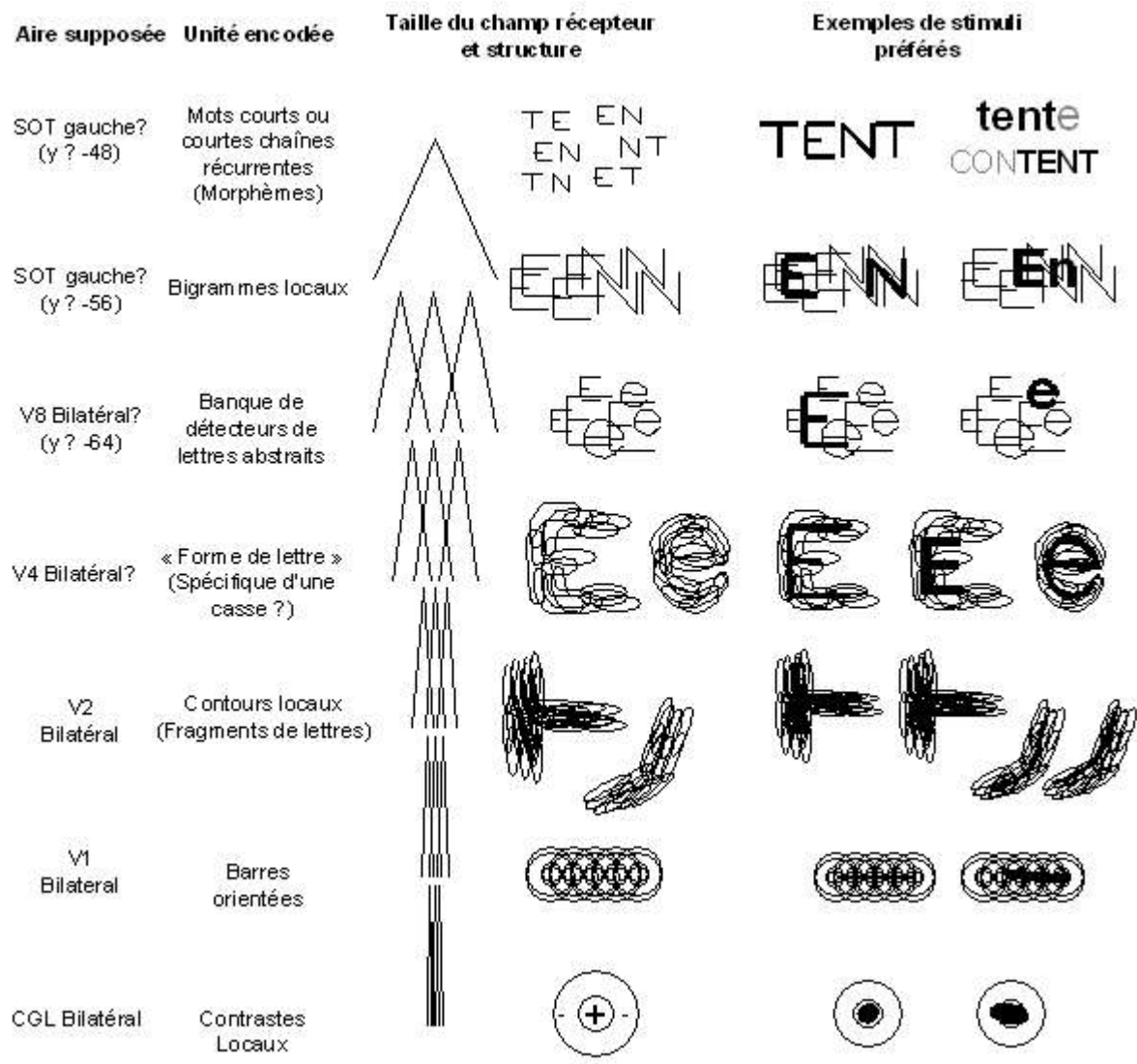


Figure. 1 Architecture de la reconnaissance invariante des mots dans le modèle LCD. Chaque neurone intègre les activités d'un sous-ensemble des neurones du niveau immédiatement inférieur, ce qui induit une augmentation de la complexité, de l'invariance et de la taille du champ récepteur à chaque étape. Seules les connections excitatrices ascendantes sont représentées ici. Néanmoins, les connections descendantes, l'inhibition collatérale et les connections inhibitrices ascendantes sont supposées jouer un rôle important dans la définition des patterns reconnus. Les aires anatomiques indiquées sont des propositions hautement putatives fondées sur des données récentes de neuroimagerie (Dehaene et al 2004, Cohen et al, 2004)



### **3. Le rôle de l'apprentissage perceptif.**

Une architecture telle que celle décrite ci-dessus pourrait induire une explosion combinatoire, du fait de l'accroissement du nombre de combinaisons possibles avec le niveau d'abstraction.

Cependant

- (1) Le nombre de positions à encoder diminue avec le niveau et avec le développement de l'invariance spatiale.
- (2) Dans ce modèle, le pattern préféré des neurones se construit par apprentissage perceptif. De fait, il est probable que lors de l'apprentissage de la lecture, ces mécanismes d'apprentissage favorisent la reconnaissance des lettres et des combinaisons de lettres fréquentes, et donc informatives. (Mozer, 1987; Riesenhuber & Poggio, 1999; Sigman & Gilbert, 2000) Au niveau des bigrammes, on prédirait ainsi l'existence de détecteurs de E-N, utiles à la reconnaissance de nombreux mots, mais peu ou pas de détecteurs de Z-F.

L'existence d'une préférence au niveau de la VWFA pour des mots ou des pseudo mots prononçables, par rapport à des chaînes de consonnes (Beauregard et al., 1997; Büchel et al., 1998; Cohen et al., 2002; Price et al., 1996; Rees, Russell, Frith, & Driver, 1999; Xu et al., 2001) suggère l'existence d'un tel apprentissage perceptif des régularités orthographique de la langue.

Enfin, un tel apprentissage perceptif devrait conduire à un renforcement des détecteurs dédiés à des zones rétiniennes fréquemment sollicitées lors de la lecture. En raison des mouvements oculaires, chez le lecteur en français, ces régions correspondraient à une zone horizontale relativement restreinte, proche de la fovéa, et essentiellement située à droite. L'apprentissage perceptif pourrait donc induire une densité et un degré de précision plus important pour les détecteurs dédiés à l'hémichamp visuel droit que pour ceux de l'hémichamp visuel gauche. Cette hypothèse pourrait rendre compte de l'asymétrie observée lors de la lecture restreinte à un seul hémichamp. (Lavidor and Ellis, 2002).

### **4. La généralisation par symétrie.**

D'après l'hypothèse du recyclage neuronal, durant l'apprentissage de la lecture, certaines aires du système ventral s'adaptent aux problèmes spécifiques posés par la reconnaissance des mots.

Si à la lumière de ces avantages, le cortex occipito-temporal du primate semble optimal pour résoudre ce genre de problème, certaines de ses propriétés initiales pourraient, à l'inverse, être des handicaps durant l'acquisition de la lecture.

Le rôle que pourrait jouer la symétrie dans une théorie de l'acquisition de la lecture est

essentiellement le même que celui du « pouce du panda », ou d'autres éléments d'imperfection, en faveur de l'évolution (Dawkins, 1996; Gould, 1992; Gould & Lewontin, 1979). Comme le notait déjà Darwin, une architecture parfaite est ambiguë, elle peut être issue d'un créateur omnipotent (dans le cas de la lecture, d'un algorithme d'apprentissage universel) ou de l'évolution (dans le cas de la lecture, d'un recyclage neuronal). La présence de propriétés imparfaites, en revanche, pourrait mettre l'accent sur le caractère recyclé d'un processus.

La généralisation aux images miroirs pourrait être une telle imperfection. En effet, la généralisation en miroir semble avoir été profondément favorisée au cours de l'évolution, probablement en raison du fait que l'identité de la majorité des objets du monde visuel reste la même après une symétrie horizontale. (Savoir comment réagir face à un tigre tourné vers la gauche après avoir survécu à un tigre tourné vers la droite peut très certainement être considéré comme un avantage évolutif !). De fait, après la présentation d'une image dans une orientation donnée, les humains et de nombreux animaux traitent son image miroir comme étant identique à l'original (Biederman & Cooper, 1991; Logothetis & Pauls, 1995). De plus, les neurones du cortex inféro-temporal répondent souvent de manière identique à un objet et à son image miroir (Rollenhagen & Olson, 2000), même après plusieurs mois d'entraînement sur une seule de ces vues (Logothetis & Pauls, 1995).

Si la généralisation en miroir était présente dans d'anciens systèmes d'écritures (égyptien, grec), qui pouvaient être lus dans les deux sens, notre alphabet, lui ne peut être lu que dans un seul sens. Pire, certaines lettres changent d'identité après une symétrie (p, d, b, d). De manière frappante, tôt dans l'apprentissage de la lecture, de nombreux enfants connaissent un « stade miroir », durant lequel ils lisent et écrivent indifféremment dans les deux directions. (Cornell, 1985; McMonnies, 1992) Cela induit bien évidemment des erreurs dans la lecture de ces lettres spéciales, fait qui pourrait persister jusqu'à l'adolescence chez certains dyslexiques (McMonnies, 1992; Terepocki, Kruk, & Willows, 2002).

Dans l'hypothèse d'un recyclage neuronal, la généralisation par symétrie pourrait être une propriété intrinsèque du système visuel du primate devant être désapprise lors de l'acquisition de la lecture. La capacité de jeunes enfants de pouvoir lire ou écrire en miroir sans aucun entraînement semble incompatible avec l'idée d'un développement purement plastique, guidé par l'exposition aux mots ou aux lettres, des mécanismes dédiés à la lecture. Elle semble en revanche compatible avec une hypothèse sélectionniste (Changeux, 1983), dans laquelle l'apprentissage de la lecture procède de la reconfiguration *a minima* d'une architecture préexistante, conçue pour la reconnaissance d'objets, et initialement invariante par symétrie.

Lors de ce travail, des expérimentations ont été conduites sur la thématique d'un désapprentissage d'une capacité intrinsèque de généralisation par symétrie. Par manque de place et souci de cohérence, ils ne seront cependant pas évoqués ici.

## 5. Effet de longueur

Dans le modèle LCD, l'analyse du mot se fait de manière parallèle. Toutes les lettres d'un mot sont reconnues et traitées simultanément par des neurones différents, et ce principe de parallélisme se poursuit durant tout le processus de traitement. Conformément à ce principe, lors de la lecture chez le sujet normal, les temps de lecture restent essentiellement constants pour des mots de longueurs différentes, au moins dans un intervalle d'environ 3 à 6 lettres. (Lavidor & Ellis, 2002; Weekes, 1997, voir cependant Whitney 2001 et Whitney et al. 2004 pour une interprétation différente de cette donnée).

Comme nous l'avons développé plus haut, des lésions au niveau de la VWFA entraînent une altération essentiellement sélective des capacités de lecture connue sous le nom d'alexie pure. Néanmoins, les patients souffrant d'alexie pure présentent le plus souvent une capacité d'identification des lettres relativement préservée, et développent une stratégie compensatrice de lecture, la lecture lettre à lettre (lecture LAL).

Le critère diagnostique de lecture lettre à lettre est l'apparition d'une corrélation positive entre les latences de lecture et le nombre de lettres du mot. Cette corrélation est connue sous le nom d'effet de longueur. Ainsi, tout se passe comme si ces patients perdaient sélectivement les mécanismes les plus spécifiques et les plus fins de la lecture, ceux-là même qui permettraient l'identification en parallèle d'une chaîne de caractères.

Cependant, l'effet de longueur ne se retrouve pas uniquement chez les patients alexiques. Il est induit chez le sujet normal par un vaste panel de situations dans lesquelles la lecture parallèle est impossible et dans lesquelles lire nécessite une stratégie sérielle, lettre à lettre.

Ainsi la dégradation des stimuli (Legge et al., 1997) ou l'utilisation de formats non usuels, pour lesquels nous n'avons pas développé d'expertise de lecture : mots en casse aLtErNéE, (Lavidor, 2002) présentation verticale (Bub and Lewine, 1988) ou dans l'hémichamp visuel gauche (Lavidor et Ellis 2002), induisent l'apparition d'un effet de longueur.

L'effet de longueur n'est pas nécessairement lié à une dégradation visuelle stimulus mais peut être induit par des étapes ultérieures du processus de lecture. Ainsi, les temps de lecture de pseudo-mots (e.g. VISIGNOL) sont marqués par un effet de longueur. Cet effet pourrait alors rendre compte de la nature sérielle de la conversion des graphèmes en phonèmes qui nécessiterait la mise en œuvre d'un parcours sériel du stimulus visuel.

En résumé, toutes les situations qui empêchent une reconnaissance strictement parallèle du mot semblent induire une stratégie alternative de lecture, la lecture lettre à lettre. Cette stratégie alternative est mise en évidence par un signe pathognomonique : l'effet de longueur.

## 6. Prédiction

Le modèle LCD se place essentiellement à l'échelle du neurone ou de la colonne corticale. Souscrit-il néanmoins à l'exigence de réfutabilité nécessaire à toute démarche scientifique?

Nous pensons que ce modèle conduit à de nombreuses prédictions, pouvant faire l'objet de vérifications expérimentales. D'une part, sur le plan comportemental, les hypothèses du modèle pourraient définir une nouvelle métrique de la similarité entre deux mots et une nouvelle définition du voisinage orthographique. Actuellement, le voisinage orthographique d'un mot est défini comme l'ensemble des mots de même longueur ne différant que par la substitution d'une de ses lettres (e.g. CLASSE CRASSE). Le modèle LCD prédit qu'une métrique composite prenant en compte les proportions de lettres et de bigrammes ouverts partagés, modulées de manière non-linéaire par leur distance rétinienne devrait être un meilleur prédicteur, (bien que plus complexe à calculer!), des effets d'amorçage ou de confusabilité lexicale. La mesure des effets de distance spatiale lors de l'amorçage (Peressotti & Grainger, 1995), de la transposition de lettres (Perea & Lupker, 2003, 2004; Schoonbaert & Grainger, 2004), ou encore sur les erreurs par migration de lettres (Davis & Bowers, 2004) pourrait fournir un test quantitatif de la structure de champ récepteur proposée dans le modèle LCD.

Toujours sur le plan comportemental, le modèle LCD prédit l'apparition d'un effet de longueur dans certaines conditions de présentation.

L'étude de patients présentant des lésions relativement sélectives d'une région cérébrale pourrait aussi permettre d'aborder la question des limites de l'expertise ventrale, et renseigner sur les mécanismes mis en jeu lors de son échec.

Enfin, et malgré la relative basse résolution spatiale de ces techniques par rapport à l'échelle cellulaire, nous pensons que les méthodes de neuro-imagerie humaines actuelles peuvent permettre une vérification expérimentale qualitative et quantitative des principes énoncés dans ce modèle.

# III Etudes

## A. Approche comportementale : Psychophysique

### 1- Introduction

Dans la chaîne de processus conduisant à la reconnaissance invariante des mots, le modèle LCD prédit l'existence de détecteurs détectant la combinaison ordonnée de 2 lettres dans une région relativement locale du champ visuel. Du fait de la structure de leur champ récepteur (fig. 1), les détecteurs de bigrammes devraient devenir brusquement non fonctionnels, pour un espacement de l'ordre de deux fois la largeur d'une lettre (e.g. M A I S O N). Au delà cet espacement, deux lettres consécutives ne pourraient plus tomber dans le champ récepteur d'un seul détecteur de bigramme.

En conséquence, le traitement parallèle des mots devrait être cassé. Le modèle LCD prévoit donc l'apparition d'une lecture non parallèle, marquée par effet de longueur pour un niveau d'espacement de l'ordre de deux fois la largeur d'une lettre.

Le paramètre de l'espacement entre les lettres a été à notre connaissance assez peu étudié dans la littérature. Ce paramètre a plutôt été utilisé pour diminuer l'inhibition collatérale, et donc pour une taille d'espacement inférieure ou égale à une lettre. De fait, augmenter légèrement l'espacement entre les lettres semble améliorer la performance de lecture (Chung 2002)

Dans cette étude, nous avons voulu mesurer l'effet de l'introduction progressive d'espacement entre les lettres dans une tâche de décision lexicale.

### Expérience 1

#### a- Matériel et méthodes

**Participants** : 12 droitiers de langue maternelle française ont participé à cette première expérience (7 hommes et 5 femmes : moyenne d'âge 24 ans). Tous avaient une vision normale ou corrigée à la normale et ne connaissaient pas le principe de l'expérience.

**Matériel** : Trois listes de 50 mots de 4 lettres, de 6 lettres et de 8 lettres, comparables en fréquence (20-50 par million,  $p=0.28$  (New et al, 2001)) ont été construites. 3 listes de 50 pseudo-mots ont été

construites. Chaque pseudo-mot était dérivé d'un mot en respectant sa structure phonologique et graphémique. Trois sujets naïfs ont évalué ces pseudo-mots comme étant possibles en Français. Les stimuli étaient présentés en majuscule, Arial, blanc sur fond noir, et étaient toujours inclus dans les dix degrés centraux.

Les stimuli étaient présentés dans deux modes différents (Espaceur E et taille de police TP), comprenant chacun cinq niveaux. Au niveau 0, les modes E et TP étaient identiques : les stimuli correspondaient à des chaînes de caractères contigus, compris dans un

cercle de diamètre  $0.25^\circ$ . A chaque niveau suivant du mode E., un espacement de  $0.25^\circ$  supplémentaire était introduit entre les lettres, tandis que la taille de police restait constante. A chaque niveau suivant du mode TP, la taille de la police était augmentée de façon à ce qu'une chaîne ait la même largeur dans les deux modes à un niveau donné, tandis que l'espacement entre les lettres restait constant. (Fig.2)

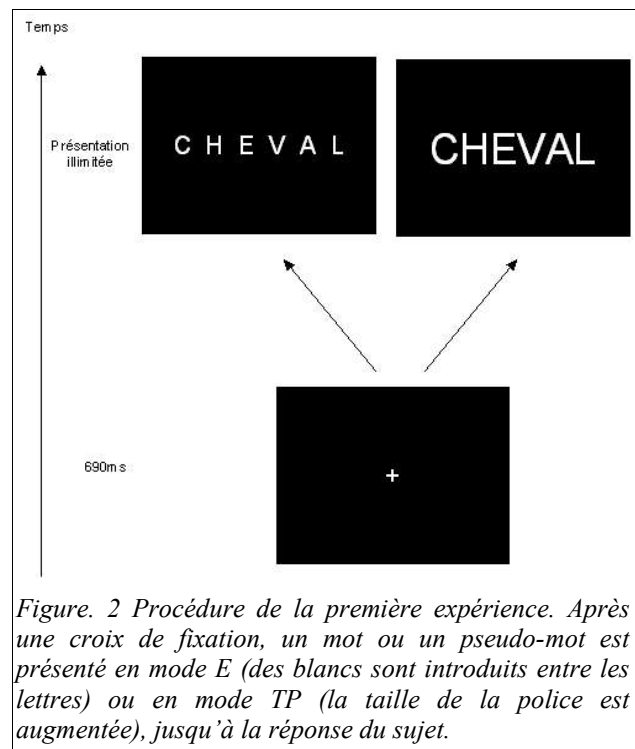


Figure. 2 Procédure de la première expérience. Après une croix de fixation, un mot ou un pseudo-mot est présenté en mode E (des blancs sont introduits entre les lettres) ou en mode TP (la taille de la police est augmentée), jusqu'à la réponse du sujet.

**Procédure (Fig3.) :** Chaque essai était constitué d'une croix de fixation affichée pendant 690 ms, suivie d'un mot ou d'un pseudo-mot affiché jusqu'à la réponse du sujet. Les sujets devaient réaliser une tâche de décision lexicale, en appuyant sur un bouton avec leur index gauche pour un pseudo-mot, et avec leur index droit pour un mot.

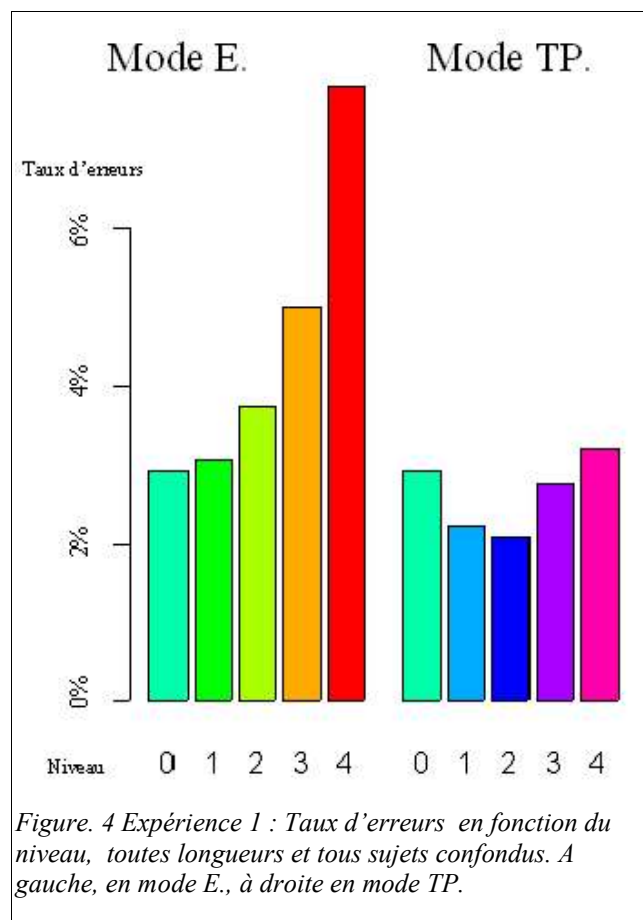
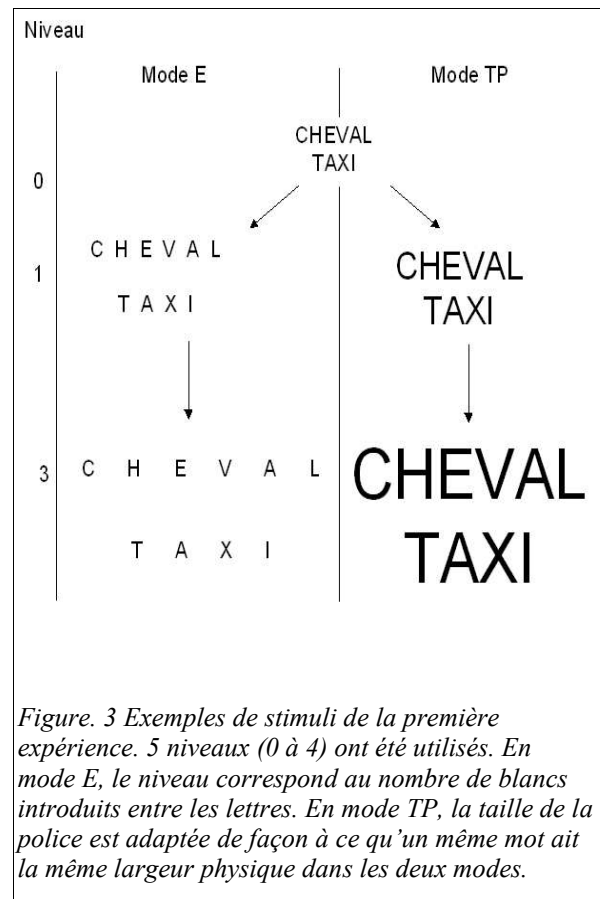
Chaque chaîne était présentée une fois dans chaque mode. Dans chaque mode, un niveau était semi-aléatoirement choisi. Un ordre semi-aléatoire différent était utilisé pour chaque sujet. 20 essais additionnels d'entraînement étaient réalisés avant l'expérience.

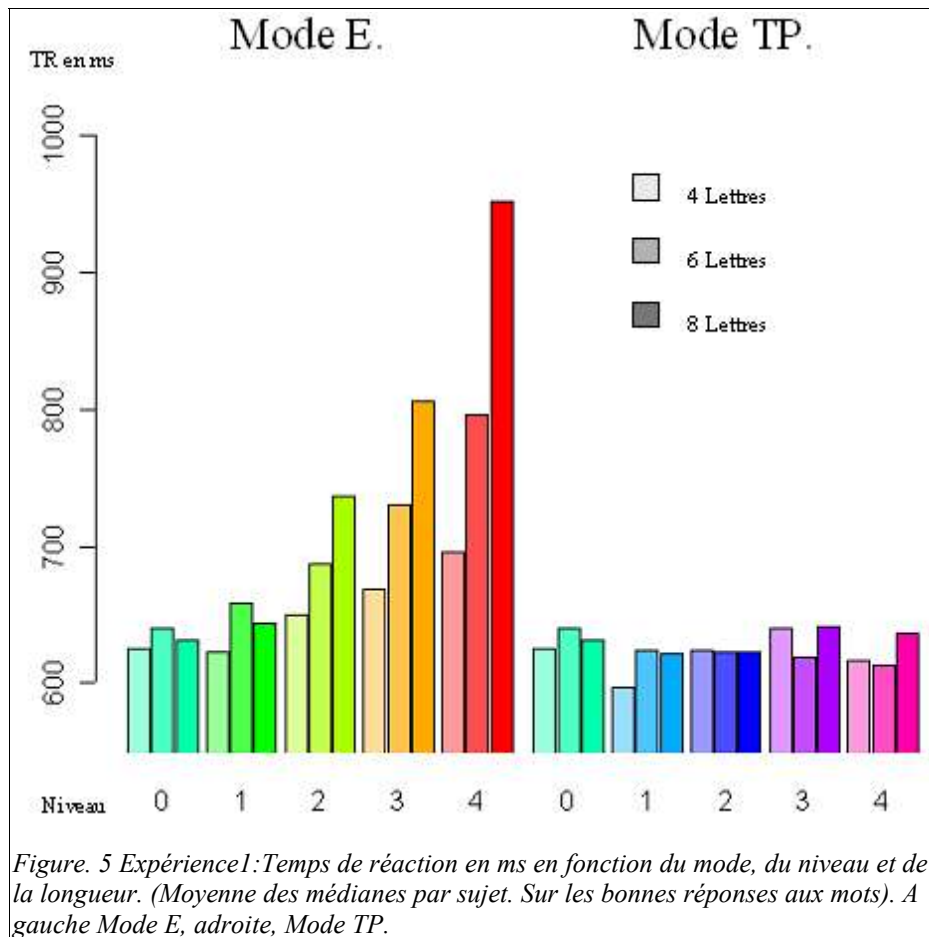
## b- Résultats

Les taux d'erreurs et les médianes des temps de réaction aux mots sur les bonnes réponses (TR) ont été calculés pour chaque sujet et pour chaque condition et entrés dans une anova à trois facteurs intra-sujets (mode, niveau et nombre de lettres) et à un facteur aléatoire (sujet).

**Taux d'erreurs :** Les taux d'erreurs de tous les sujets étaient inférieurs à 10%. Il n'y avait pas d'effet de la longueur des mots, ni d'interaction impliquant ce facteur. Il y avait une interaction entre le mode et le niveau. ( $F(4,44)=4,38$ ;  $P<0,001$ ) En mode E, le taux d'erreur augmentait avec le niveau ( $F(8,88)=6,76$ ;  $P<0,001$ ), tandis qu'il ne différait pas selon les conditions en mode TP ( $P>0,1$ ). (Fig4)

**Temps de réaction :** Les TR montraient essentiellement le même pattern. Il y avait une triple interaction entre le mode, le niveau et la longueur ( $F(8,88)=9,21$ ;  $P<0,001$ ). Les deux modes donc été analysés séparément. (Fig.4)



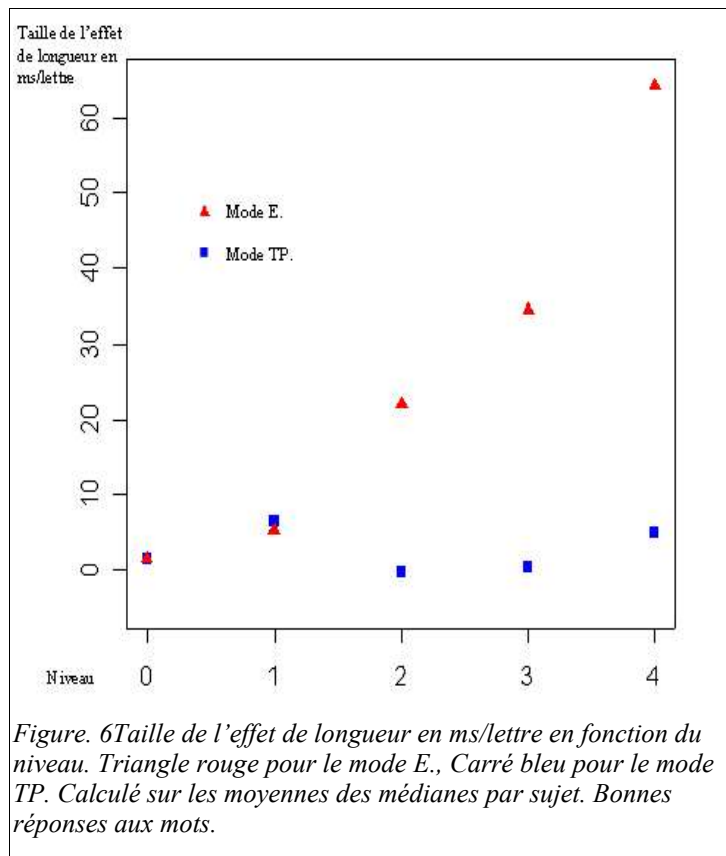


En mode TP, il n'y avait pas d'effet de la longueur ou du niveau, ni d'interaction impliquant ces facteurs.

En mode E, les TR augmentaient avec le niveau d'espacement ( $F(4,44)=81,42$  ;  $P<0,001$ ) et avec la longueur des mots ( $F(2,22)=35,38$  ;  $P<0,001$ ). Il y avait une interaction entre ces deux facteurs ( $F(8,88)=18,2$  ;  $P<0,001$ ), avec une apparition et une augmentation de l'effet de longueur pour des niveaux supérieurs à 1. Des comparaisons restreintes aux niveaux consécutifs ont montré une augmentation des TR entre les niveaux 1 à 4 (1 à 2: 50ms;  $F(1,11)=21,40$ ;  $P<0,001$ ; 2 à 3: 43ms;  $F(1,11)=6,34$ ;  $P=0,03$ ; 3 à 4: 80ms;  $F(1,11)=26,33$ ;  $P<0,001$ ). La différence entre les niveaux 0 et 1 était plus faible (11ms) et non significative ( $P>0,1$ ).



Une analyse restreinte à chaque niveau a montré que l'effet de longueur était significatif pour les niveaux 2 à 4 (2:  $F(2,22)=12,73$ ;  $P<0,001$ ; 3:  $F(2,22)=10,27$ ;  $P<0,001$ ; 4:  $F(2,22)=47,27$ ;  $P<0,001$ ), et qu'il augmentait avec le niveau ( $R=0.57$ ,  $P<0.001$ ). De manière symétrique, l'effet de niveau était présent pour toutes les longueurs (4lettres:  $F(4,44)=4,67$ ;  $P<0,01$ ; 6 lettres:  $F(4,44)=14,07$ ;  $P<0,001$ ; 8 lettres:  $F(4,44)=58,21$ ;  $P<0,001$ ), et augmentait avec elle. ( $R=0.64$ ,  $P<0.001$ ). (Fig. 6)



Mode E.						
Longueur/Niveau	0	1	2	3	4	Total
4	2,7	3,3	4,2	5,8	8,3	4,9
6	4	3,8	3,8	3,8	9,2	4,9
8	2	2,1	3,3	5,4	5,8	3,8
Total	2,9	3,1	3,8	5	7,8	4,5
Mode TP						
Longueur/Niveau	0	1	2	3	4	Total
4	2,7	2,9	1,2	4,2	3,3	2,9
6	4	2,1	2,1	2,5	4,2	3
8	2	1,7	2,9	1,7	2,1	2,1
Total	2,9	2,2	2,1	2,8	3,2	2,6

Tableau. 1Expérience 1 : Taux d'erreurs par longueur, niveau et mode.

Mode E.						
Longueur\Niveau	0	1	2	3	4	Total
4	625	622	650	668	695	652
6	640	659	687	730	796	702
8	631	643	737	806	952	754
Total	632	641	691	735	814	703
Mode TP.						
Longueur\Niveau	0	1	2	3	4	Total
4	625	597	624	640	617	621
6	640	624	623	619	612	624
8	631	622	623	641	636	631
Total	632	614	623	633	622	625

Tableau 2 Expérience 1 : Temps de réaction par longueur, niveau et mode. (Moyenne des médianes par sujet. Bonnes réponses aux mots).

Mode\Niveau	0	1	2	3	4
Espacement	1	5	22	35	64
TaillePolice	1	6	0	0	5

Tableau 3 Expérience 1: Taille de l'effet de longueur en ms/lettre., par mode et par niveau.

## C- Discussion

Les taux d'erreurs augmentaient avec l'espacement mais pas avec la taille de la police. De même l'espacement induisait une augmentation des TRs à partir de deux blancs d'espacement, marquée par un effet de longueur.

Ces résultats étaient conformes aux prédictions. Si l'espacement entre les lettres bloque le processus de reconnaissance des mots dans la voie ventrale, une augmentation des taux d'erreurs et des RT est attendue. De plus, si un mécanisme alternatif de lecture sériel doit être en place pour permettre la lecture, un effet de longueur est attendu.

Cependant, au moins un facteur expérimental pourrait expliquer ces résultats. En mode TP, la taille de la police augmentait le niveau et donc avec l'excentricité. A l'inverse, en mode E, elle demeurait constante quelle que soit le niveau, et donc quelle que soit l'excentricité. L'acuité visuelle chutant brusquement avec l'excentricité, la présence de petites lettres en périphérie pourrait rendre compte de ces résultats.

### 3- Expérience 2

Pour séparer ces deux hypothèses, l'excentricité et l'espacement doivent être manipulés de façon à prédire des résultats différents à une taille de police donnée. En d'autres mots, ces deux paramètres doivent jouer l'un contre l'autre. Dans une deuxième expérience, nous avons comparé la lecture de mots 'espacés' (mode E.) et de mots déplacés en périphérie (mode D.), pour une même excentricité maximale (Fig.7). Si les résultats de la première expérience peuvent être entièrement expliqués par la présence de petites lettres en périphérie, un avantage pour les mots espacés est prédit (excentricité moyenne moins importante, et moins forte inhibition collatérale). A l'inverse, si une part importante des résultats résulte de l'espacement entre les lettres, un avantage aux mots déplacés est prédit.

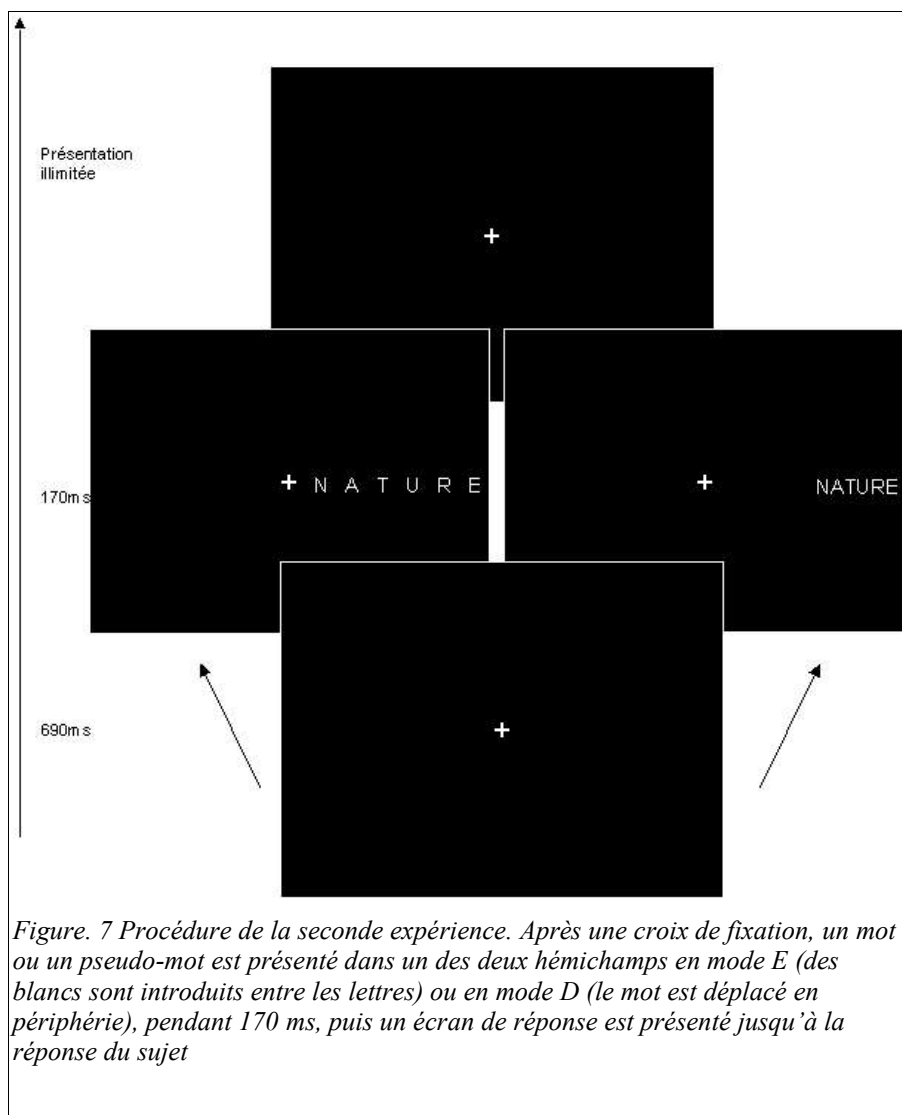


Figure. 7 Procédure de la seconde expérience. Après une croix de fixation, un mot ou un pseudo-mot est présenté dans un des deux hémichamps en mode E (des blancs sont introduits entre les lettres) ou en mode D (le mot est déplacé en périphérie), pendant 170 ms, puis un écran de réponse est présenté jusqu'à la réponse du sujet

## a- Matériel et méthodes

**Participants:** 18 sujets (11 hommes et 7 femmes, moyenne d'âge 23 ans) obéissant aux mêmes critères que pour l'expérience 1 ont participé à cette expérience.

**Matériel :** Un sous ensemble des stimuli de la première expérience comprenant uniquement les mots de 4 lettres et 6 lettres a été utilisé. Tous les stimuli étaient présentés en Arial 7 pt blanc sur fond noir, et étaient toujours compris dans les 10 degrés centraux.

Les stimuli étaient présentés dans deux modes différents (Espacement E et déplacement D) comprenant chacun cinq niveaux. Au niveau 0, les deux modes étaient physiquement identiques, les stimuli étant constitués de chaînes de caractères contigus (compris dans un cercle de diamètre  $0.25^\circ$ ) présentées dans un hémichamp visuel. Dans le mode E, chaque niveau correspondait à une augmentation de l'espacement entre les lettres (0.6, 1.2, 1.8 et 2.4 espaces de  $0.25^\circ$ ). Dans le mode D, chaque niveau correspondait à une augmentation de la translation.

Pour un niveau donné, tous les mots étaient alignés sur le bord latéral des mots de 6 lettres en mode D. Tous les mots étaient donc justifiés à une même excentricité maximale pour un niveau donné. (Fig. 8)

Niveau	A gauche	A droite
0	CHEVAL TAXI	+CHEVAL TAXI
1	CHEVAL TAXI	CHEVAL TAXI
2.4	CHEVAL TAXI	CHEVAL TAXI

*Figure. 8 Exemples de stimuli de la seconde expérience. 5 niveaux (0, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4) ont été utilisés. En mode E, le niveau correspond au nombre de blancs introduits entre les lettres. En mode D, le mot est déplacé à la même excentricité maximale. Au final, pour un niveau donné, tous les mots ont un bord latéral justifié à une même excentricité maximale. Ce dernier point induit un décalage entre les mots de 4 lettres et les mots de 6 lettres, qui rend donc l'effet de longueur non pertinent.*

**Procédure :** Chaque essai était constitué d'une croix de fixation de 690 ms, suivie d'un mot ou d'un pseudo-mot présenté pendant 170 ms de sorte d'empêcher les saccades oculaires (Fig.7). Une croix de fixation était alors présentée jusqu'à ce que la réponse déclenche l'essai suivant. La tâche était la même que dans la première expérience.

Tous les stimuli étaient présentés une fois dans chaque mode. Dans chaque mode, un niveau et un hémichamp étaient semi-aléatoirement choisis. Un ordre semi-aléatoire différent était utilisé pour chaque sujet. 60 essais additionnels d'entraînement étaient réalisés avant l'expérience.

## b- Résultats

Les taux d'erreurs et les médianes des temps de réaction aux mots sur les bonnes réponses (TR) ont été calculés pour chaque sujet et pour chaque condition et entrés dans une ANOVA à quatre facteurs intra-sujets (hémichamp, mode, niveau et nombre de lettres<sup>1</sup>) et à un facteur aléatoire (sujet).

**Taux d'erreurs :** Il y avait une interaction marginale entre la longueur, le mode, le niveau et l'hémichamp ( $F(4,68)=2,2712$  ;  $P=0,07$ ), une interaction de la longueur, du niveau et de l'hémichamp ( $F(4,68)=3,362$  ;  $P=0,014$ ) et une interaction de la longueur, du mode et de l'hémichamp ( $F(1,17)=6,59$  ;  $P=0,020$ ). Les résultats pour chaque hémichamp ont donc été analysés séparément. (Fig.9)

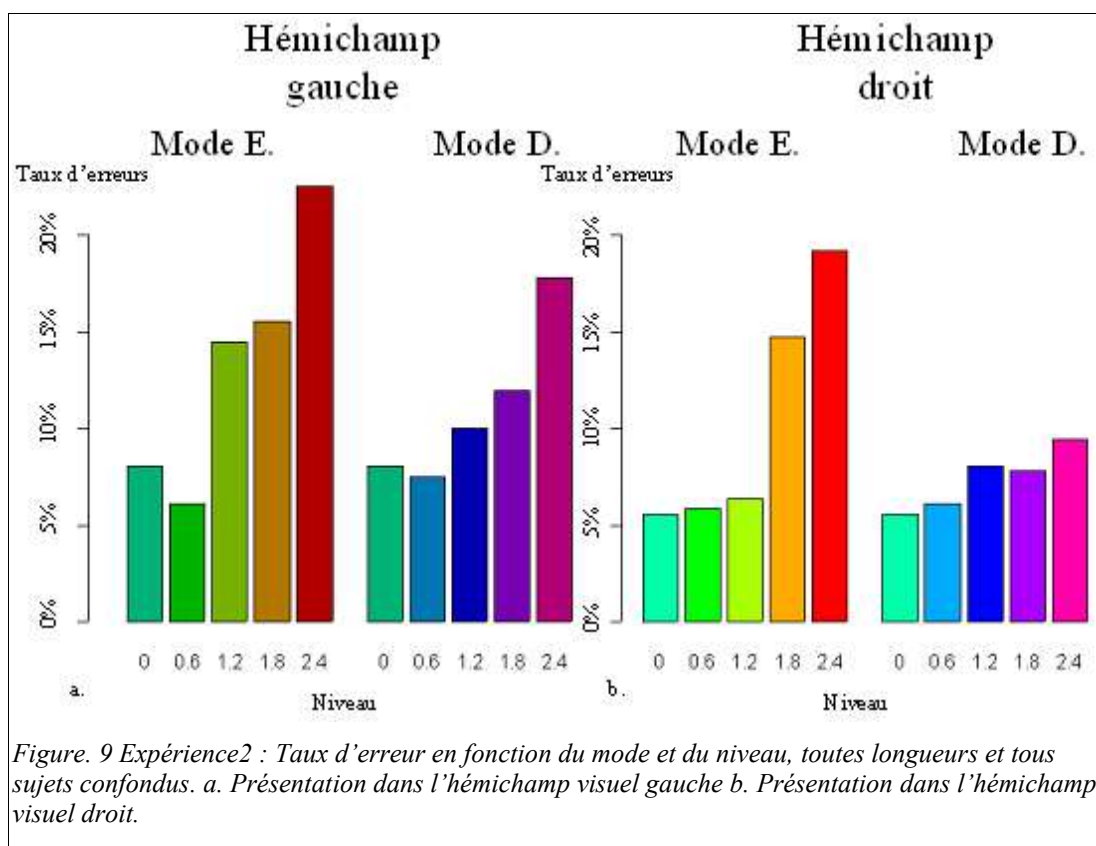


Figure. 9 Expérience2 : Taux d'erreur en fonction du mode et du niveau, toutes longueurs et tous sujets confondus. a. Présentation dans l'hémichamp visuel gauche b. Présentation dans l'hémichamp visuel droit.

A gauche : le taux d'erreur augmentait avec le niveau ( $F(4,68)=13.31$ ;  $P<0.001$ ), en mode E ( $F(4,68)=11.61$ ;  $P<0.001$ ) comme en mode D ( $F(4,68)=4.92$ ;  $P<0.01$ ). Un effet du mode était marginalement significatif ( $F(1,17)=4.40$ ;  $P=0.051$ , avec plus d'erreurs en mode E).

A droite : Il y avait une forte interaction du niveau et du mode ( $F(4,68)=7,76$ ;  $P<0,001$ ). En mode E,

<sup>1</sup> Comme décrit précédemment, le bord latéral des mots de 4 et de 6 lettres était aligné à un niveau donné. Par conséquent, la première lettre des mots de 4 lettres et celle des mots de 6 lettres étaient alignées pour les stimuli présentés dans l'hémichamps gauche, alors qu'elles ne l'étaient pas dans l'hémichamp droit. Pour la même raison, l'excentricité moyenne des mots de 4 lettres et celle des mots de 6 lettres n'étaient pas à la même distance de la fixation. Ces différences systématiques, prédominant nettement pour le mode E, étaient confondus avec les résultats. Par souci de clarté, nous décrirons dans un premier temps les résultats sur l'ensemble des mots de quatre et de six lettres. Le détail des effets de longueur et leur discussion sont présentés en annexe.

les taux d'erreurs augmentaient avec le niveau ( $F(4,68)=16,25$ ;  $P<0,001$ ), avec une brusque augmentation entre 1.2 et 1.8 espacements. A l'inverse, il n'y avait pas d'effet du niveau en mode D. Pour les niveaux les plus élevés (1.8 et 2.4), les taux d'erreurs étaient plus importants en mode E qu'en mode D (respectivement  $F(1,17)=11,74$  ;  $P<0,01$  ,  $F(1,17)=16,31$  ;  $P<0,001$ ). 1

**Temps de réaction** : Le pattern des TRs était similaire à celui observé pour les taux d'erreurs, montrant des effets différents dans les deux hémichamps. (interaction de la longueur, du niveau, du mode et de l'hémichamp:  $F(4,66)=4.03$  ;  $P<0,01$ ). (Fig.10)

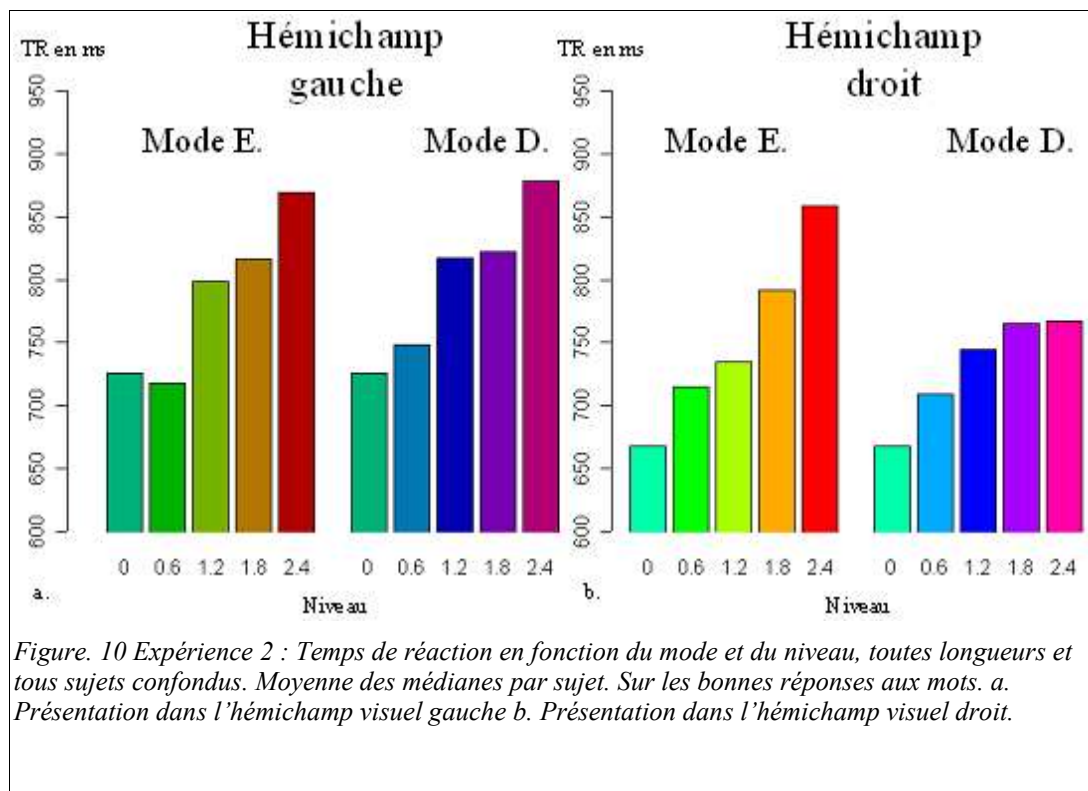


Figure. 10 Expérience 2 : Temps de réaction en fonction du mode et du niveau, toutes longueurs et tous sujets confondus. Moyenne des médianes par sujet. Sur les bonnes réponses aux mots. a. Présentation dans l'hémichamp visuel gauche b. Présentation dans l'hémichamp visuel droit.

A gauche : Les TR augmentaient avec le niveau ( $F(4,67)=31.61$ ;  $P<0.001$ ) en mode E comme en mode D (respectivement  $F(4,67)=14.82$ ;  $P<0.001$  et  $F(4,68)=20,50$ ;  $P<0.001$ ), sans différence significative ( $P>0.1$ )

A droite : Il y avait une forte interaction entre le mode et le niveau ( $F(4,68)=6.14$ ;  $P<0.001$ ). Les TRs augmentaient avec le niveau dans le mode E comme dans le mode D (respectivement  $F(4,68)=24,38$  ;  $P<0,01$  et  $F(4,68)=6,56$  ;  $P<0,001$ ), mais avec des profils différents. En mode E, les TR augmentaient brutalement et atteignaient 860ms. En mode D, l'augmentation était plus modérée, atteignant seulement 770ms. Les TRs étaient plus lents en mode E qu'en mode D au niveau 2.4 ( $F(1,17)=18.02$  ;  $P<0,001$ ).

Hémichamp Gauche						
Mode E.						
Longueur\Niveau	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Total
4	6,9	3,9	14,4	10,6	17,8	10,7
6	9,2	8,3	14,4	20,6	27,2	15,9
Total	8,1	6,1	14,4	15,6	22,5	13,3
ModeD.						
Longueur\Niveau	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Total
4	6,9	6,7	10	13,3	14,4	10,3
6	9,2	8,3	10	10,6	21,1	11,8
Total	8,1	7,5	10	11,2	17,8	11,1
Hémichamp Droit						
Mode E.						
Longueur\Niveau	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Total
4	6,1	5	7,2	15,6	23,9	11,6
6	5	6,7	5,6	13,9	14,4	9,1
Total	5,6	5,9	6,4	14,8	19,2	10,3
ModeD.						
Longueur\Niveau	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Total
4	6,1	6,1	7,2	7,8	10,6	7,6
6	5	6,1	8,9	7,8	8,3	7,2
Total	5,6	6,1	8,1	7,8	9,5	7,4

Tableau 4 Expérience 2 : Taux d'erreur par longueur, niveau, mode et hémichamp.

Hémichamp Gauche						
Mode E.						
Longueur\Niveau	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Total
4	717	701	758	771	818	753
6	735	735	839	862	922	819
Total	726	718	799	817	870	785
ModeD.						
Longueur\Niveau	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Total
4	717	724	805	799	889	787
6	735	772	829	846	868	810
Total	726	748	817	823	879	798
Hémichamp Droit						
Mode E.						
Longueur\Niveau	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Total
4	674	744	754	817	902	778
6	661	686	714	766	816	729
Total	668	715	734	792	859	753
ModeD.						
Longueur\Niveau	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Total
4	674	728	759	787	767	743
6	661	691	730	742	767	718
Total	668	710	745	765	767	731

Tableau 5 Expérience 2 : Temps de réaction par longueur, niveau, mode et hémichamp. Moyenne des médianes par sujet. Sur les bonnes réponses aux mots.

## c- Discussion

A une même excentricité maximale, les taux d'erreurs étaient plus élevés pour les mots espacés que pour les mots translétés. Cet effet était particulièrement marqué dans l'hémichamp visuel droit. Les difficultés pour lire les mots espacés semblaient apparaître brutalement pour un espacement supérieur ou égal à 1.8 blancs. De même, dans l'hémichamp droit, les temps de réaction étaient plus importants pour les mots espacés que pour les mots simplement translétés en périphérie. Néanmoins, aucune différence significative n'a été retrouvée à gauche.

L'excentricité moyenne et l'inhibition collatérale étaient plus importantes pour les mots non espacés. Cependant, les mots espacés demeuraient plus difficiles à lire. Ces résultats plaident pour un effet de l'espacement indépendant de l'excentricité. Les résultats de la première expérience ne peuvent donc pas être pleinement expliqués par la présence de petites lettres en périphérie.

**Effet de l'hémichamp** . Dans l'hémichamp droit, l'effet du mode était très important. A l'inverse, dans l'hémichamp gauche, aucun effet n'a été retrouvé pour les TRs, et seul un effet marginal a été retrouvé pour les taux d'erreurs. Ces résultats plaident pour un processus de traitement des mots qualitativement différent dans les deux hémichamps visuels. Ils sont consistants avec l'effet de longueur sur les temps de lecture retrouvé pour des mots présentés dans l'hémichamp visuel gauche, et absent pour des mots présentés dans l'hémichamp visuel droit.

## 4- Expérience 3

Une troisième expérience qui ne sera pas détaillée ici a été conduite chez les mêmes sujets. Le même paradigme était dans une tâche écologique de lecture : Des mots de 5 lettres espacés ou déplacés étaient présentés dans l'un des champs visuels, et les sujets devaient les lire le plus rapidement possible à voix haute. Nous avons répliqué un avantage aux mots déplacés, et une interaction importante avec l'hémichamp de présentation.

Dans l'ensemble, les résultats des expériences 2 et 3 plaident donc pour un effet de l'espacement indépendant de l'excentricité dans l'hémichamp droit. Dans l'hémichamp gauche, cet effet semble moins robuste et pourrait être non séparable de l'effet de l'excentricité.



## 5- Expérience 4

Au moins une autre hypothèse pouvait rendre compte des résultats précédents. Si le mode de traitement sériel de l'information est induit par l'excentricité (présence de petites lettres en périphérie), mais que le temps requis pour lire une chaîne de caractères est proportionnel à la largeur physique du stimulus (du fait d'un parcours attentionnel plus long), tous les stimuli des deux expériences précédentes pourraient avoir été lus de façon sérielle. Les difficultés pour lire les mots espacés résulteraient alors de leur largeur physique et non de leur espacement.

Pour séparer ces deux hypothèses, l'espacement et la largeur physique des stimuli doivent être manipulés de façon à jouer l'un contre l'autre. Dans cette quatrième expérience, nous avons comparé la lecture de mots de 4- 6- ou 8-lettres en manipulant l'espacement de sorte que les mots de ces trois catégories aient la même longueur physique. (Fig.11) Si les résultats de la seconde et de la troisième expérience peuvent être expliqués par la taille physique des stimuli, des performances identiques sont prédites pour des mots de nombre de lettre différent, mais de largeur physique identique. A l'inverse, si l'espacement a un rôle déterminant, à largeur égale, on prédit un avantage pour les mots les moins espacés, c'est à dire pour les mots de 8 lettres.

### a- Matériel et méthodes

**Participants :** 12 sujets (5 hommes et 7 femmes, moyenne d'âge 22 ans) obéissant aux mêmes critères que pour la première expérience ont participé à cette étude.

**Matériel :** Nous avons utilisé un sous ensemble de 40 items de chacune des listes de mots ou de pseudo-mots de la première expérience. Tous les stimuli étaient présentés en Arial 7pt, en blanc sur fond noir, et étaient toujours inclus dans les 10 degrés centraux.

Tous les stimuli ont été présentés en mode E. Quatre largeurs ont été utilisées (correspondant à des largeurs de 8, 12, 15, ou 18 caractères contigus). Pour chaque largeur, l'espacement des mots de 4, de 6 et de 8 lettres était ajusté de sorte qu'ils fassent tous la même largeur physique. Pour une largeur donnée, tous les mots avaient donc la même largeur et les mêmes bords latéraux. (Fig.11)

Les stimuli étaient présentés soit dans l'hémichamp visuel gauche, soit dans l'hémichamp visuel droit.

**Procédure** : La séquence de présentation et la tâche étaient la même que dans la deuxième expérience. Les 120 mots et les 120 pseudo-mots ont été présentés une fois dans chaque hémichamp. A chaque essai, une largeur était semi-aléatoirement choisie. Un ordre semi-aléatoire différent était utilisé pour chaque sujet. 48 essais additionnels d'entraînement étaient réalisés avant l'expérience.

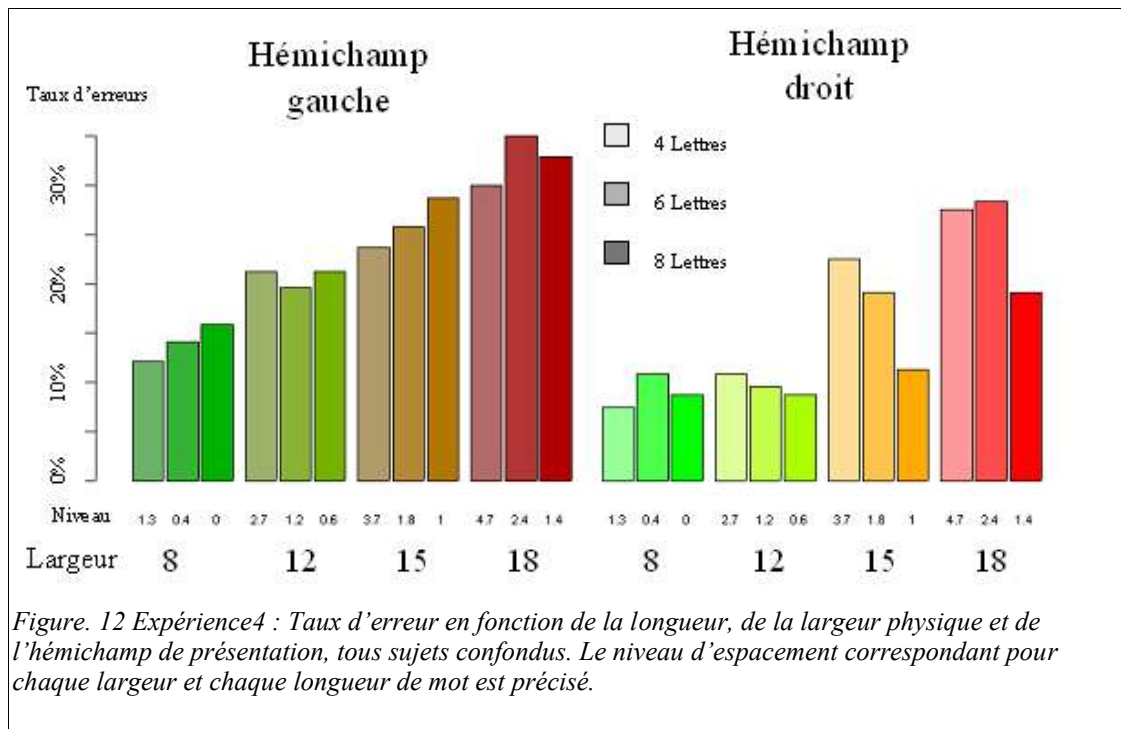
Largeur	A gauche	A droite
8	PANTALON+ CHEVAL+ TAXI+	+PANTALON +CHEVAL +TAXI
12	PANTALON+ CHEVAL+ TAXI+	+PANTALON +CHEVAL +TAXI
15	PANTALON+ CHEVAL+ TAXI+	+PANTALON +CHEVAL +TAXI

*Figure. 11 Expérience 4 : Exemple de stimuli. 4 largeurs (8, 12, 15, 18) ont été utilisées. Cette largeur correspond à la largeur physique du stimulus, exprimée en nombre de lettres de 0.25°contiguës. L'espacement entre les lettres est ajusté pour chaque longueur de mot, de sorte d'égaliser la largeur physique de tous les mots à une largeur donnée. Chaque mot est présenté dans un hémichamp.*

## b- Résultats

Les taux d'erreurs et les médianes des temps de réactions sur les bonnes réponses ont été calculés et entrés dans une ANOVA à 3 facteurs intra-sujets (longueur (nombre de lettres), largeur (physique) et hémichamp), et à un facteur aléatoire (sujet).

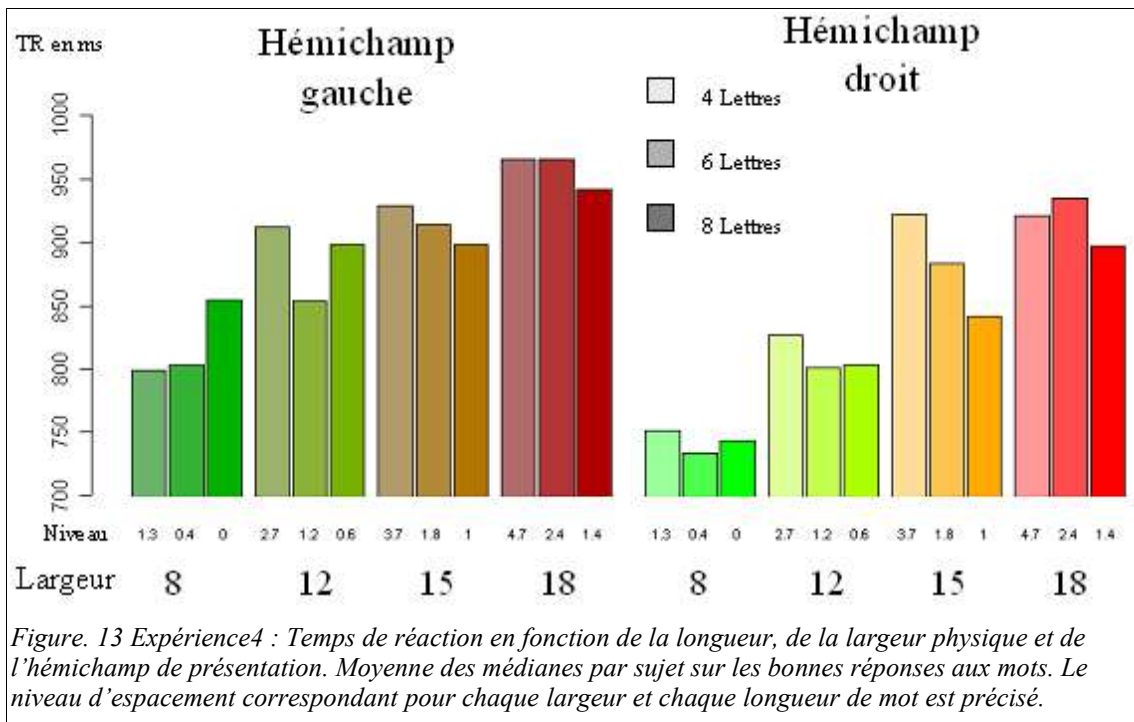
**Taux d'erreurs:** Le pattern d'erreur était différent dans les deux hémichamps, avec une interaction de la longueur et de l'hémichamp ( $F(2,22)=6.40$  ;  $P<0,01$ ). Il y avait un effet global de la largeur( $F(3,33)=42.1$  ;  $P<0,001$ ), avec plus d'erreurs pour des largeurs plus importantes. (Fig12)



Dans l'hémichamp gauche, seul un effet de la largeur était significatif ( $F(3,33)=30.03$  ;  $P<0.001$ ). Il n'y avait pas d'effet global de la longueur, ni d'interaction impliquant ce facteur. Des comparaisons restreintes à chaque largeur ne montraient pas non plus d'effet de longueur.

Dans l'hémichamp droit, il y avait un effet de la largeur ( $F(3,33)=23.24$  ;  $P<0.001$ ) et un effet de la longueur ( $F(2,22)=9.26$  ;  $P<0.01$ ), avec plus d'erreurs pour les mots courts. De fait, cet effet ne devenait significatif que pour des largeurs importantes (respectivement  $F(2,22)=10,59$ ;  $P<0.001$  et  $F(2,22)=3,63$ ;  $P=0.04$  pour 15 et 18 caractères de large) tandis qu'il n'était pas significatif pour des largeurs moins importantes ( $P>0.1$ ).

**Temps de réaction :** Le pattern de temps de réaction était différent dans les deux hémichamps, avec une interaction de la largeur et de l'hémichamp. ( $F(3,33)=3.32$  ;  $P=0,03$ ). (Fig.13)



Dans l'hémichamp gauche, il y avait juste un effet de la largeur ( $F(3,33)=11.80$  ;  $P<0.001$ ). Une interaction de la longueur et de la largeur était marginalement significative ( $F(6,66)=2.14$ ;  $P=0.06$ ). Dans l'hémichamp droit, il y avait un effet de la largeur ( $F(3,33)=18.33$  ;  $P<0.001$ ) et un effet de la longueur ( $F(2,22)=5.37$  ;  $P=0.01$ ), avec des temps de réaction plus importants pour les mots les plus courts.

Hémichamp Gauche					
Longueur\Largeur	8	12	15	18	Total
4	12,1	21,3	23,7	30	21,8
6	14,2	19,6	25,8	35	23,7
8	15,8	21,3	28,7	32,9	24,7
Total	14	20,7	26,1	32,6	23,4
Hémichamp droit					
Longueur\Largeur	8	12	15	18	Total
4	7,5	10,8	22,5	27,5	17,1
6	10,8	9,6	19,2	28,3	17
8	8,8	8,8	11,2	19,2	12
Total	9	9,7	17,6	25	15,4

Tableau 6 Expérience 4 : Taux d'erreurs par longueur du mot, largeur physique et hémichamps de présentation.

Hémichamp Gauche					
Longueur\Largeur	8	12	15	18	Total
4	799	912	929	965	901
6	803	853	914	965	884
8	854	898	898	942	898
Total	819	888	914	957	894
Hémichamp droit					
Longueur\Largeur	8	12	15	18	Total
4	751	827	922	921	855
6	733	801	883	935	838
8	743	803	841	897	821
Total	742	810	882	918	838

*Tableau 7*Expérience 4 : Temps de réaction par longueur du mot, largeur physique et hémichamps de présentation. Moyenne des médianes par sujet sur les bonnes réponses aux mots.

### c- Discussion

Dans l'hémichamp gauche, aucune différence significative n'a été retrouvée pour des mots de longueur différente à une largeur physique donnée. A l'inverse, dans l'hémichamp droit, les mots les moins espacés, c'est à dire les plus longs, étaient lus plus rapidement et avec moins d'erreurs.

Ces résultats sont cohérents avec les prédictions, et plaident pour un fort effet de l'espacement, au moins dans l'hémichamp droit. Ils plaident aussi pour un traitement des mots qualitativement différent dans les deux hémichamps.

## 6- Discussion générale

Dans la première expérience, nous avons montré que l'introduction d'espacement entre les lettres induisait un effet de longueur. Nous avons montré que, conformément aux prédictions du modèle LCD, cet effet de longueur apparaissait pour un seuil d'espacement de l'ordre de 2 caractères. Dans les expériences 2, 3 et 4, nous avons répliqué cet effet, et vérifié que les résultats de la première expérience ne pouvaient être pleinement attribués à une baisse de l'acuité visuelle liée à l'excentricité, ou à la largeur physique des stimuli. Enfin, dans l'expérience 3, nous avons partiellement répliqué ces résultats dans une tâche naturelle de lecture à voix haute.

Cependant, dans les expériences 2, 3 et 4, une forte asymétrie a été retrouvée entre l'hémichamp visuel et l'hémichamp visuel gauche. Dans l'hémichamp visuel droit, l'effet de l'espacement était clairement dissociable et quantitativement supérieur à l'effet de l'excentricité. A l'inverse, dans l'hémichamp visuel gauche, l'effet de l'espacement semblait être plus faible, étant parfois même indissociable d'un effet de l'excentricité. Cette asymétrie plaide en faveur d'un traitement

qualitativement différent entre les deux hémichamps. Cette idée a déjà été avancée dans la littérature (Cohen et al 2003), notamment en raison de l'effet de longueur retrouvé pour des mots présentés dans l'hémichamp visuel gauche, et non pour des mots présentés dans l'hémichamp visuel droit (Lavidor et Ellis 2002). Cependant, d'autres auteurs ont avancé que cette différence ne reflétait pas une différence qualitative, et pouvait être renversée sous certaines conditions (Witney 2004).

Ainsi que nous l'avons précisé, une construction des voies visuelles de la lecture basée sur l'apprentissage perceptif pourrait conduire à des variations de la densité et du degré de précision des détecteurs de combinaison en différents points de la rétinitopie.

Nous pensons que cette dernière hypothèse pourrait expliquer l'effet de longueur retrouvé lors de la lecture de mots restreints à l'hémichamp visuel gauche. Les résultats de ce travail semblent compatibles avec cette explication.. En effet, si la lecture dans l'hémichamp gauche est naturellement sérielle du fait d'un déficit en détecteurs (et notamment détecteurs de bigrammes), l'espacement, supposé briser cette reconnaissance par les bigrammes, ne devrait pouvoir induire qu'un effet très faible par rapport à celui induit dans l'hémichamp droit, où les détecteurs de bigrammes sont nombreux et la lecture massivement parallèle.

Enfin, nous n'avons montré l'effet de l'espacement, et déterminé son seuil d'apparition, que pour une taille de police donnée. De plus amples investigations, pour certaines actuellement en cours, seront nécessaires pour répliquer l'effet de ce paramètre à travers différentes tailles de polices. Plus important d'un point de vue théorique, la nature du rapport entre le seuil d'espacement critique, et la taille de la police utilisée reste un paramètre à déterminer. Le modèle LCD prédit que le seuil d'espacement exprimé en degrés doit augmenter de manière relativement linéaire avec la taille de la police, en restant autour d'une valeur de 2.

Globalement, nous avons voulu tester une prédiction comportementale directe et non triviale du modèle LCD. Nous avons obtenu des résultats pleinement compatibles avec les prédictions, tant sur plan qualitatif que sur le plan quantitatif. Bien sûr, une telle observation est loin d'être définitive. D'une part, d'autres modèles peuvent prédire un effet global de l'espacement. Néanmoins, la dynamique de l'effet, son caractère non-linéaire, et la valeur numérique du seuil devraient être pris en compte dans la modélisation des processus de reconnaissance des mots. D'autre part, de plus amples investigations, tant sur le plan comportemental, avec l'étude paramétrique de la relation entre la taille de la police et le seuil, que sur le plan de la neuro-imagerie fonctionnelle, pour confirmer le substrat neurophysiologique de cet effet, devraient être effectuées

Dans notre première expérience, nous avons utilisé l'apparition d'un effet de longueur comme un signe diagnostique du passage à la lecture sérielle. Ce signe critique nous apparaît en effet comme pathognomonique de la mise en échec de la voie ventrale, et de la nécessité de mettre en place un

autre mode de lecture. La neuropsychologie pourrait permettre de mettre en évidence les mécanismes de cet autre mode de lecture. En outre, la question des limites de l'expertise ventrale pourrait aussi être abordée, via la pathologie, en tuant les capacités de lecture sérielle.

## **B/ Approche neuropsychologique.**

Les alexies se définissent comme des troubles de la lecture acquis à la suite de lésions cérébrales, et regroupent donc plusieurs syndromes. Leur classification se calque globalement sur l'organisation des systèmes cérébraux de la lecture, à une étape visuelle ou lors des étapes ultérieures (lexicale, phonologique, sémantique notamment). Voir annexe

### **1. Introduction**

Les mécanismes sous-tendant la lecture lettre à lettre ne peuvent se comprendre dans une conception isolée du cortex visuel ventral. Si celui-ci permet la reconnaissance des lettres et l'analyse en parallèle d'une chaîne de lettres, d'autres régions cérébrales sont vraisemblablement nécessaires à la mise en oeuvre d'une lecture sérielle.

Les processus attentionnels et spatiaux sous-tendus par les lobes pariétaux, pourraient notamment être impliqués dans ce type de lecture, comme l'indiquent des études en IRMf sur la lecture de mots en miroir chez le sujet normal (Poldrack 1998, Poldrack 2001) et sur la lecture de mots chez le patient alexique (Cohen et al 2004).

Si l'apparition d'un effet de longueur chez le sujet normal révèle un échec de la voie ventrale lors du traitement du mot en parallèle, et le déclenchement d'un parcours attentionnel impliquant la voie occipito-pariétale du 'où ?', les patients souffrant de lésions pariétales devraient alors être déficitaires précisément dans les situations induisant un tel effet de longueur chez le sujet normal. Plus généralement, l'étude des conditions dans lesquelles un tel déficit apparaît pourrait clarifier le rôle des voies dorsales dans la lecture de mots isolés, et montrer les limites de l'expertise ventrale.

### **2. Présentation du cas**

La patiente était une femme de 63 ans, droitère, sans antécédents médicaux particuliers à l'exception d'une hypertension traitée et d'épisodes dépressifs, suivie dans le cadre d'une atrophie bipariétale progressive. Son IRM anatomique montrait une atrophie corticale majeure prédominant

sur les lobes pariétaux, et dans une moindre mesure frontaux, avec une préservation relative du cortex occipito-temporal. (Fig.14)

Sur le plan clinique, la patiente se plaignait depuis trois ans de troubles de la praxie et de troubles visuels interférant avec les activités de la vie quotidienne. L'examen révélait une vaste symptomatologie d'origine pariétale bilatérale. (1) Syndrome de Gerstmann complet (agraphie, acalculie, agnosie digitale, confusion droite-gauche) (2) Hémi-négligence gauche (3) Syndrome apraxique (idéomoteur, constructif et d'habillage) (4) Simultanagnosie. Contrastant avec ces déficits, la patiente montrait des capacités d'identification d'objets ou d'images normales. Ainsi qu'un empan mnésique normal.

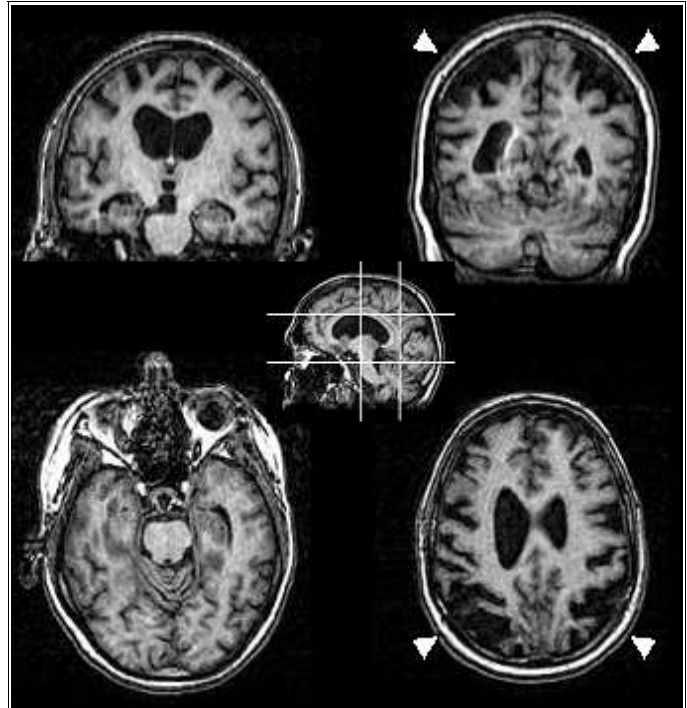


Figure. 14 IRM anatomique cérébrale pondérée en T1 de la patiente. En haut, coupes coronales, en bas, coupes axiales. A gauche, coupes centrées sur le cortex occipito-temporal. A droite, coupes centrées sur le cortex occipito-pariétal.

### 3. Lecture écologique

La patiente se plaignait d'être devenue incapable de lire et en effet, toute lecture de texte était rigoureusement impossible. Son attention semblait sauter aléatoirement de mot en mot sans possibilité de pouvoir parcourir le texte de façon organisée. (Fig.15) Quant aux quelques mots qu'elle lisait, elle le faisait en général correctement. De fait sa lecture de lettres ou de mots présentés de manière isolée était rapide (de l'ordre de la demi-seconde) et presque toujours correcte. En bref, la lecture reflétait tout à la fois les troubles généraux de la localisation des objets dans l'espace, liés à l'atrophie pariétale, et la préservation de l'identification des objets individuels, liée à la préservation relative du cortex occipito-temporal. Par ailleurs, sa lecture de pseudo-mots (e.g. VISIGNOL) était fortement altérée avec plus de 70% d'erreurs.



Nous avons présenté à la patiente des chaînes de lettres, dans des conditions de présentation s'écartant des conditions standard de lecture de mot ( i.e. Chaînes de lettres contiguës, présentées de manière centrale, horizontalement , de gauche à droite). Nous avons utilisé des conditions de présentation connues pour induire un effet de longueur chez le sujet normal : présentation par hémichamp (Lavidor & Ellis 2002), chaînes de lettres en miroir, verticales (Bub and Lewine, 1988), tournées (Lavidor & al 2001) ou espacées ( Voir ci-dessus). Nous avons enregistré les réponses de la patiente ainsi que ses temps de réponses.

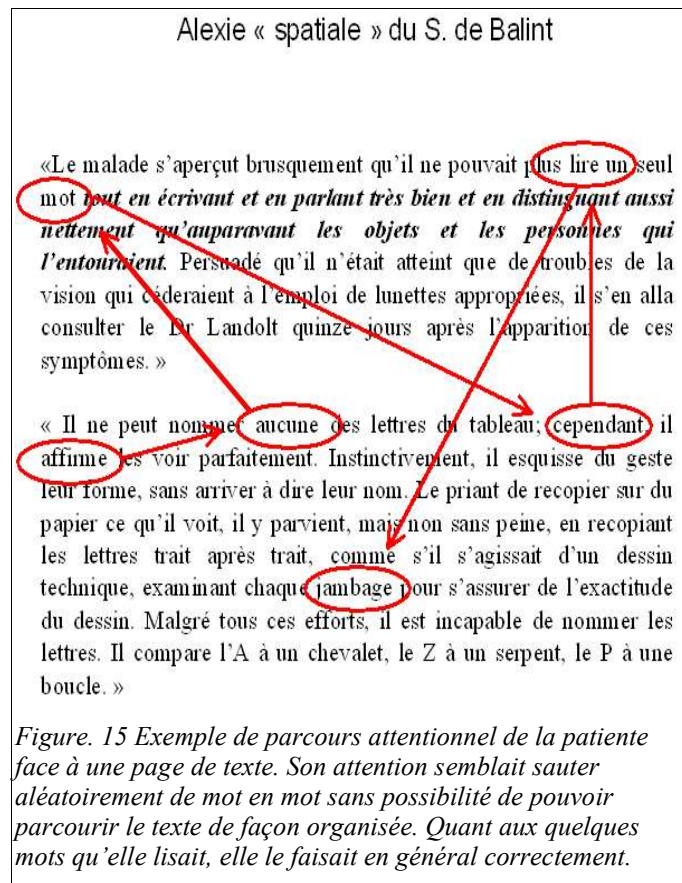
Cependant, lors de nombreuses tâches, la patiente répondait très lentement, avec des hésitations fréquentes, et devait être encouragée à répondre. De fait, la variable expérimentale la plus robuste était les taux d'erreur. Les temps de réponses ne seront pas présentés ici.

## 4- Lecture de mots verticaux ou écrits en miroir

### a- Matériel & Méthodes

Nous avons préparé trois listes de 20 mots incluant une proportion égale de mots de 3-6 lettres, comparables en terme de fréquence ( $p=0.5$ ), de nombre de syllabes ( $p=0.12$ ) et de voisinage ( $p=0.36$ ). Chacune des deux premières listes a été présentée (1) de manière horizontale, canonique (2) verticalement. Les mots de la troisième liste ont été présentés horizontalement, mais dans une configuration miroir (figure. 16).

Les stimuli étaient présentés de manière centrale, pour une durée illimitée. Afin d'aider la patiente à orienter son attention, chaque mot était précédé d'une matrice de croix convergeant rapidement de la périphérie vers le centre de l'écran. Les différents modes de présentation ont été expliqués à la patiente, qui devait juste lire chaque mot à voix haute.



## b- Résultats

La patiente était excellente avec les mots en présentation normale (2.5% d'erreurs). En revanche, la lecture de mots verticaux était quasiment impossible (77.5% d'erreurs). Le taux d'erreur augmentait avec la longueur (de 50% pour les mots de 3 lettres à 100% pour les mots de 6 lettres).

Par ailleurs, toute lecture de mot en miroir était virtuellement impossible.

LECTURE	L E C T U R E	ERUTCEJ
2.5%	77.5%	100%

*Figure. 16 Exemples de stimuli horizontaux, verticaux et en miroir présentés à la patiente, et taux d'erreur associés*

## c- discussion

Chez le sujet normal, la présentation de mots verticaux est connue pour induire un effet de longueur sur les temps de réponse (Bub and Lewine, 1988). En admettant que cela reflétait un traitement attentionnel sériel, un fort déficit était attendu, ce qui fut de fait le cas. Une explication analogue peut être donnée à l'impossibilité de lire des mots écrits en miroir.

## 5. Lecture de mots restreints à un hémichamp

### a- Matériel et méthodes.

Deux des trois listes utilisées dans l'expérience précédente ont été utilisées. Les mots pouvaient être présentés soit dans l'hémichamp visuel gauche, soit dans l'hémichamp visuel droit. Le bord interne des mots était aligné sur la ligne médiane. Les mots étaient présentés 170 ms, en Arial 18pts, blanc sur fond noir.

### b- Résultats

La patiente était très performante avec les mots présentés dans l'hémichamp droit, avec seulement 10% d'erreurs. A l'inverse, dans l'hémichamp gauche, sa lecture était très déficiente, avec 75 % d'erreurs.

### **c- Discussion.**

Chez le sujet normal, la lecture de mots présentés dans l'hémichamp gauche induit un effet de longueur, tandis que la lecture de mots présentés dans l'hémichamp droit est normale (Lavidor et Ellis 2002). Le taux d'erreurs important observé chez cette patiente pour la lecture pourrait résulter soit d'une incapacité à effectuer une lecture sérielle, soit d'une manifestation de son hémignégligence gauche. Ces deux mécanismes pourraient rendre compte du déficit observé.

## **6. Lecture de mots inclinés**

Dans la première expérience, nous avons vu que la patiente pouvait lire normalement des mots horizontaux, mais non des mots verticaux. Dans cette expérience, nous avons étudié la dégradation progressive de sa performance à travers un continuum d'angles de rotation possibles.

### **a- Matériel et méthodes**

Nous avons préparé deux listes de 50 mots de 5 lettres et de 7 lettres comparables en fréquence (fréquence comprise entre 20 et 45 par million  $p=0.78$ ). Nous avons utilisé deux modes de rotation, 'globale' et 'escalier' (voir fig. 17), et 5 angles de rotation ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $80^\circ$ , trigonométrique ou antitrigonométrique). Tous les mots ont été présentés une fois dans chaque mode, et associés semi-aléatoirement à un angle de rotation. Les mots étaient présentés de manière centrale, illimitée, et était précédés de la même matrice de croix convergentes que dans l'expérience 1. La patiente devait lire chaque mot à voix haute.

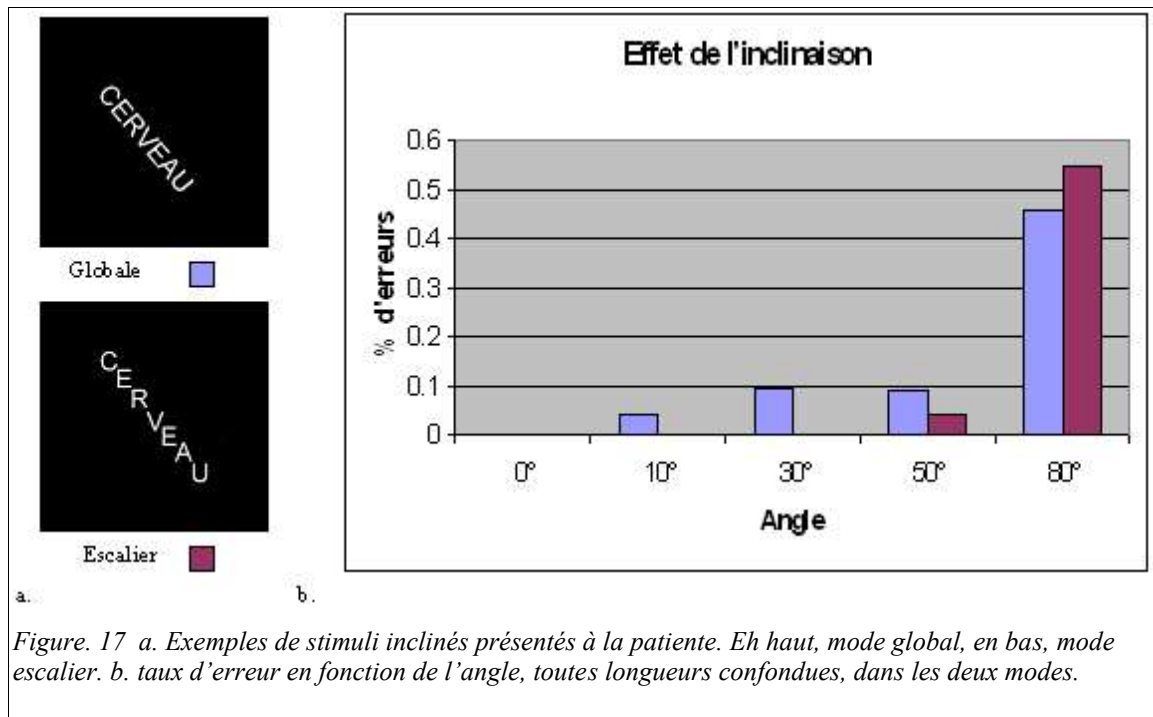
Dans un second temps, les mêmes stimuli ont été présentés dans une tâche de description de l'orientation des mots. A chaque essai, la patiente devait rapporter si les mots étaient dans une configuration horizontale normale, ou s'ils étaient anormalement tournés.

### **b- Résultats**

Il n'y avait pas de différence significative entre les deux sens de rotation, ni entre les mots de 5 lettres et les mots de 7 lettres. Nous avons donc regroupé ces conditions. Les taux d'erreurs dépendaient de l'angle dans les deux modes de rotation ( $\chi^2(4)>20$ ;  $P<0.001$ ). La patiente était performante pour un angle inférieur ou égal à  $50^\circ$  (global: 5.7% d'erreurs; escalier: 1.1%

d'erreurs). Dans cet intervalle, les taux d'erreurs ne variaient pas avec l'angulation ( $\chi^2(3)=2.72$ ;  $p=0.52$ ). A l'inverse, les taux d'erreur à 80° différaient très significativement des autres angulations ( $\chi^2(1)>17$ ;  $P<0.001$ ). De fait, ils augmentaient brutalement entre 50 et 80°, atteignant respectivement 45% et 54% dans les modes global et escalier. (Fig.17)

Point remarquable, la patiente ne pouvait rapporter l'orientation des stimuli. Même pour les stimuli tournés de 80°, et indépendamment de sa performance, elle indiquait toujours que les stimuli étaient présentés de manière horizontale, sans anomalie particulière de l'orientation.



Global										
Longueur\Angle	0°	10°	30°	50°	80°					
5	0\10	0,00%	0\12	0,00%	1\10	10,00%	1\12	8.3%	4\10	40,00%
7	0\12	0,00%	1\12	8.3%	1\11	9.1%	1\10	10,00%	6\12	50,00%
Total	0\22	0,00%	1\24	4.2%	2\21	9.5%	2\22	9.1%	10\22	45,00%
Escalier										
Longueur\Angle	0°	10°	30°	50°	80°					
5	0\10	0,00%	0\11	0,00%	0\11	0,00%	0\12	0,00%	5\11	45.5%
7	0\12	0,00%	0\11	0,00%	0\11	0,00%	1\11	9.1%	7\11	63.6%
Total	0\22	0,00%	0\22	0,00%	0\22	0,00%	1\23	4.3%	12\22	54.5%

Tableau 8 Taux d'erreur de la patiente en fonction de la longueur, de l'angle et du mode.

### c- Discussion

En résumé, la différence considérable de performance entre la lecture de mots verticaux et la lecture de mots horizontaux observée chez cette patiente semblait résulter d'une chute brutale de

performance autour d'un angle compris entre 50 et 80°. Cet angle est compatible avec le seuil d'apparition d'un effet de longueur observé chez le sujet normal (Koriat 1985, Lavidor 2001). La prédiction générale d'un déficit apparaissant dans les conditions provoquant un effet de longueur chez le sujet normal est donc respectée.

Par ailleurs, la patiente présentait une dissociation franche entre une capacité de lecture conservée jusqu'à un angle de 50° et une incapacité à percevoir l'orientation quel que soit l'angle de rotation. Cette dissociation illustre à nouveau le contraste entre la préservation de la voie ventrale de lecture et les lésions pariétales empêchant d'évaluer explicitement l'inclinaison.

## **7. Lecture de mots espacés**

Dans les expériences précédentes, nous avons modifié l'organisation générale des chaînes de lettres. Dans les expériences suivantes, nous avons utilisé des stimuli horizontaux, mais rendus plus difficiles à lire du fait de l'introduction d'espacements entre les lettres. Comme nous l'avons développé précédemment, ce type de stimuli induit un effet de longueur chez le sujet normal.

### **a- Matériel & Méthodes**

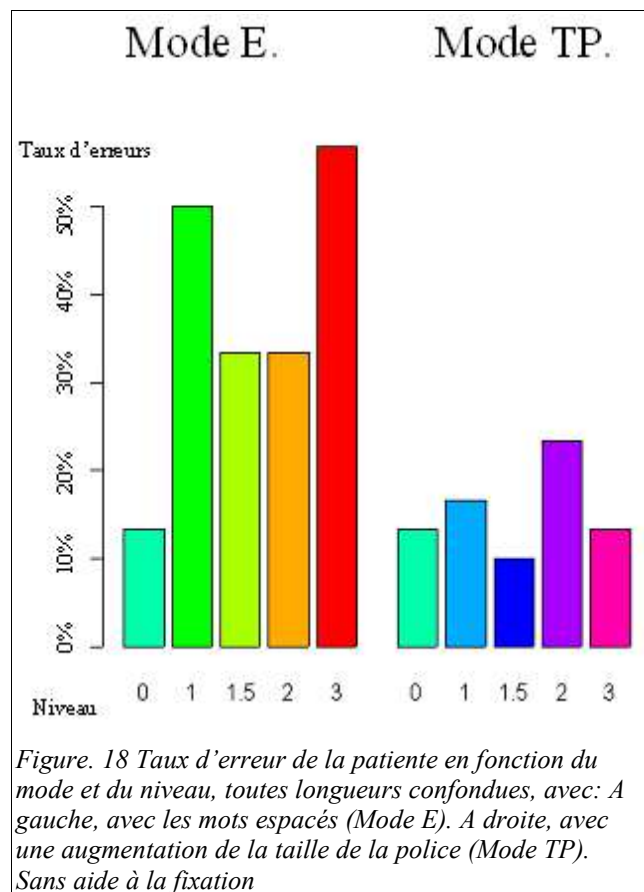
Le dessin expérimental était le même que lors de l'expérience 1 de comportement mais (1) du fait des difficultés de la patiente à lire les pseudo-mots, la tâche était de lire les mots à voix haute, (2) la taille de police utilisée était légèrement plus grosse (0.36°) et (3) les niveaux d'espacement étaient adaptés en conséquence, de sorte de rester dans les 10° centraux (niveaux d'espacement utilisés : 0, 1, 1.5, 2, 3).

### **b- Résultats**

Au niveau 0, (mots constitués de petites lettres contiguës), la patiente faisait 13.3% d'erreurs. Sa performance n'était pas altérée par la modification de la taille de la police. À l'inverse, sa performance chutait lorsque de l'espace était introduit entre les lettres (Niveau 1 à 3 en mode E : 43.3% d'erreurs  $\chi^2(1)=14.9$  ;  $P<0.001$ ). La différence entre ces deux modes de présentation était hautement significative. ( $\chi^2(1)=20.5$  ;  $P<0.001$ ).

En mode E, un unique espace introduit entre les lettres suffisait à faire chuter la performance. Ainsi, la différence entre le niveau 0 et le niveau 1 était hautement significative ( $\chi^2(1)=11.8$  ;  $P<0.001$ ) tandis qu'aucune différence significative n'était retrouvée entre les niveaux ultérieurs  $\chi^2(3)=5.2$  ;  $P>0.1$ ). (Fig.18)

Il n'y avait pas d'effet de la longueur des mots ni d'interaction impliquant ce facteur.



Mode E.											
	0	1	1,5	2	3						Total
4	1\20	5,00%	6\10	60,00%	2\10	20,00%	2\10	20,00%	6\10	60,00%	17\60
6	2\20	10,00%	4\10	40,00%	0\10	0,00%	4\10	40,00%	7\10	70,00%	17\60
8	5\20	25,00%	5\10	50,00%	8\10	80,00%	4\10	40,00%	4\10	40,00%	26\40
Total	8\60	13,33%	15\30	50,00%	10\30	33,33%	10\30	33,33%	17\30	56,67%	
Mode TP.											
	0	1	1,5	2	3						Total
4	1\20	5,00%	1\10	10,00%	1\10	10,00%	3\10	30,00%	1\10	10,00%	7\60
6	2\20	10,00%	0\10	0,00%	1\10	10,00%	2\10	20,00%	1\10	10,00%	6\60
8	5\20	25,00%	4\10	40,00%	1\10	10,00%	2\10	20,00%	2\10	20,00%	14\60
Total	8\60	13,33%	5\30	17,00%	3\30	10,00%	7\30	23,00%	4\30	13,00%	

Tableau 9 Taux d'erreurs de la patiente en fonction de la longueur, du niveau et du mode. Sans aide attentionnelle.

### c- Discussion

En résumé, introduire de l'espacement entre les lettres faisait chuter la performance de moins de 15% à plus de 40% d'erreurs. Ce pattern d'erreurs est en accord avec notre hypothèse générale, puisque les sujets normaux présentent un effet de longueur lors de la lecture de mots anormalement espacés. Cependant, chez le sujet normal, cet effet n'apparaissait qu'à un espacement de deux caractères ou plus, alors qu'un seul caractère d'espacement suffisait à faire chûter la performance de la patiente. Une explication possible pour cette différence quantitative entre les seuils retrouvés chez la patiente et chez les sujets normaux pourrait résider dans un déficit de la patiente à correctement

placer sa fenêtre attentionnelle. Les taux d'erreurs pourraient donc résulter d'une part d'une altération de sa lecture sérielle, et d'autre part d'une altération 'simultanagnosique' de sa capacité à définir une fenêtre attentionnelle englobant la totalité des stimuli. Ce déficit pourrait constituer une source d'erreurs supplémentaire, présente pour un espacement d'un seul caractère. La même expérience a donc été reconduite, en utilisant une aide spatiale conçue pour aider la patiente à placer son attention sur les stimuli.

## **8. bis Réplication**

### **Matériel & Méthodes**

Le dessin expérimental était une réplication de l'expérience précédente mais :

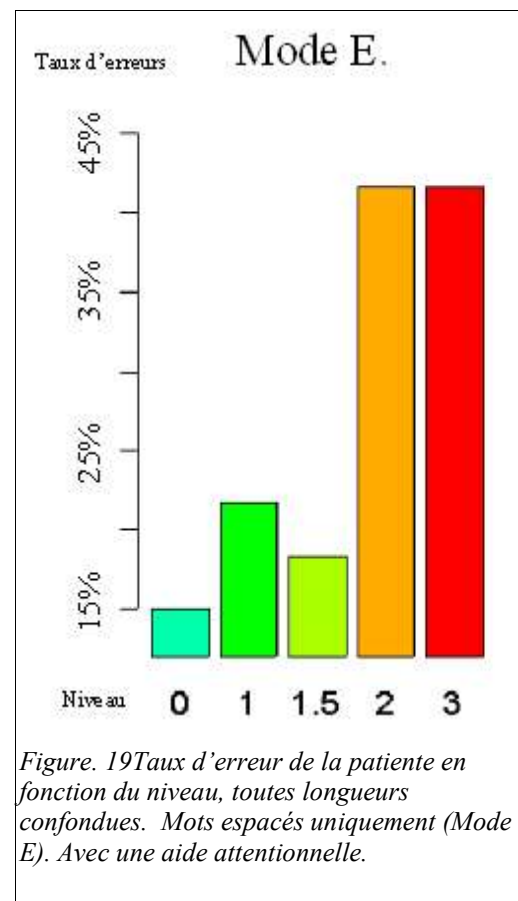
- Tous les mots étaient présentés en mode E
- La matrice de croix convergentes utilisée pour la première expérience précédait chaque essai, afin d'aider la patiente à porter son attention sur les stimuli.

#### **a- Résultats**

Tous niveaux confondus, la présence de la matrice de croix convergentes conduisait à une amélioration marginale des performances ( $p=0.14$ ). De fait, cette amélioration ne semblait apparaître que pour les niveaux d'espacement 1 et 1.5 ( $\chi^2(1)=8.41$  ;  $P<0.01$ ).

L'espacement des mots conduisait toujours à une augmentation des taux d'erreurs, de 20% pour des lettres contiguës (niveau 0) à 42% pour 3 blancs (niveau 3).  $\chi^2(4)=17.2$  ;  $P<0.01$ ). Cependant, le profil des erreurs était différent, puisque l'insertion de 2 espacements et non de 1 seul était nécessaire pour induire une chute des performances de la patiente. : La différence entre les niveaux 1.5 et 2 était hautement significative ( $\chi^2(1)=7.9$  ;  $P<0.01$ ), tandis qu'il n'y avait de différence significative ni entre les niveaux 0 à 1.5 ( $\chi^2(2)<1$ ), ni entre les niveaux 2 et 3 ( $\chi^2(1)<1$ ).

Il n'y avait pas d'effet de la longueur des mots ni d'interaction impliquant ce facteur.



Mode E.											
	0		1		1,5		2		3		Total
4	3\20	15,00%	3\20	15,00%	3\20	15,00%	7\20	35,00%	5\20	25,00%	21\100
6	2\20	10,00%	4\20	20,00%	4\20	20,00%	8\20	40,00%	9\20	45,00%	23\100
8	4\20	20,00%	6\20	30,00%	4\20	20,00%	7\20	35,00%	7\20	35,00%	28\100
Total	10\60	16,7%	13\60	21,7%	11\60	18,3%	22\60	36,7%	21\60	35,00%	

Tableau. 10 Taux d'erreur de la patiente en fonction de la longueur et du niveau. Avec aide attentionnelle.

## b- Discussion

En résumé, cette expérience répliquait les résultats généraux de l'expérience précédente: les performances de la patiente étaient fortement détériorées lors de la lecture de mots espacés. Cependant, l'utilisation d'une aide attentionnelle augmentait légèrement la performance globale, et modifiait le seuil critique d'espacement. En d'autres mots, et contrairement à l'expérience précédente, une séparation des lettres d'un espacement et demi ne suffisait pas à détériorer la performance de la patiente : deux espacements étaient maintenant nécessaires. Deux mécanismes dorsaux distincts pourraient donc expliquer les difficultés de la patiente (1) Un trouble initial de l'engagement de l'attention sur une région appropriée de l'espace, partiellement sujet à une correction par l'utilisation d'une aide attentionnelle. (2) Un trouble de la lecture sérielle, requise pour un espacement de 2 caractères ou plus, qui ne bénéficierait pas de l'aide à la fixation.



## 9. Discussion générale sur l'effet de longueur

En bref, nous avons admis que cette patiente souffrait de lésions relativement sélectives du système attentionnel et spatial dorsal. Nous avons raisonné sur l'idée que la lecture est un processus ventral parallèle, et que l'effet de longueur induit chez le sujet normal dans certaines conditions de présentation reflétait une mise en échec de ce mode de lecture, requérant la mise en oeuvre d'un mode de lecture sériel impliquant le cortex occipito-pariétal. Nous avons alors cherché à identifier les altérations du mode de présentation susceptibles de mettre en difficulté la patiente lors de sa lecture de mots, en prédisant que ces situations seraient précisément celles induisant un effet de longueur chez le sujet normal.

Conformément aux prédictions, toutes les situations induisant un effet de longueur chez le sujet normal étaient marquées d'un taux d'erreur élevé chez cette patiente. Cependant, les taux d'erreurs dans ces différentes conditions étaient assez disparates, ce qui pourrait refléter un 'apport' dorsal plus ou moins important. De plus amples investigations, chez le sujet sain ou chez des patients cérébro-lésés, seraient nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Par exemple, une corrélation entre le déficit et la taille de l'effet de longueur ou le niveau d'activation dorsal chez le sujet sain pourrait être attendue.

Par ailleurs, une analyse détaillée de la nature des erreurs effectuées par ce type de patient pourrait peut-être permettre de préciser les mécanismes sous-tendant leur production, et donc de révéler des informations cruciales sur la nature du code utilisé par le système expert ventral de reconnaissance des mots. Nous avons essayé de réaliser une telle analyse sur le corpus d'erreurs de cette patiente. Malheureusement, ce corpus était insuffisant pour permettre de dégager un tableau clair des mécanismes mis à l'oeuvre dans l'encodage des mots.

Enfin, cette patiente souffrait de lésions relativement distribuées et bilatérales du cortex pariétal, et, en conséquence, d'une vaste symptomatologie. Il est donc probable que certains des déficits retrouvés chez cette patiente soient dissociables, car relevant de mécanismes différents. Le recoupement de données provenant de la neuropsychologie, de la psychologie expérimentale ou la neuro-imagerie fonctionnelle chez le sujet sain devrait permettre de mieux comprendre le rôle des structures pariétales dans la lecture de mots isolés, et de mieux prendre en charge de genre de déficit.

## 10 . L'agnosie d'orientation

La patiente était pleinement capable d'identifier des objets et de nommer ou de désigner leurs parties (eg. le manche d'une casserole) . En revanche, elle ne pouvait faire la différence entre une casserole tournée vers la droite et une casserole tournée vers la gauche. Ces deux images en miroir lui apparaissaient comme étant parfaitement identiques. Comme nous l'avons décrit plus haut, la patiente ne pouvait décrire l'orientation de mots tournés et ce, même pour des angles où sa lecture devenait déficitaire. Elle était donc agnosique pour l'orientation des objets. Plusieurs cas cliniques publiés dans la littérature rapportent une telle agnosie pour l'orientation des objets suite à des lésions impliquant les lobes pariétaux. Une double dissociation entre une agnosie pour la rotation, et une agnosie pour la symétrie (Priftis et al 2003, Turnbull et al 96, Turnbull et al 1997 Turnbull 1997, Turnbull et al 2002) a pu être montrée<sup>2</sup>. Dans certains cas, cependant, une dissociation entre le répertoire écrit et le reste des stimuli visuels a été montrée. Ainsi, certains patients sont-ils parfaitement incapables de différencier deux images -abstraites ou concrètes- ne différant l'une de l'autre que par une symétrie horizontale, mais peuvent parfaitement distinguer un R d'un Я ou une CHAINE de lettres d'une ЭИИAHQ de lettres. Cependant, cette dissociation n'avait été montrée que pour des stimuli non réversibles, et consistaient donc à différencier un objet connu d'un objet inconnu.. Dans cette expérience, nous avons évalué l'agnosie d'orientation de cette patiente pour différents types de stimuli, incluant des pseudo-mots réversibles comme boup et quod.

### a- Matériel & méthodes:

Nous avons préparé 12 items originaux pour chacune des 4 catégories utilisées : visages, caractères chinois, outils et pseudo-mots réversibles. Les pseudo-mots étaient des chaînes de 4 lettres réversibles dont l'image miroir était aussi lisible (e.g. boup - quod). Quatre images modifiées ont été dérivées pour chaque image (1) 30° de rotation (2) 60° de rotation (3) Symétrie gauche-droite (4) changement de couleur (dégradé de rose à la place d'un dégradé de gris). 480 paires de stimuli ont été présentées. Chacune des paires comprenait soit deux fois le même stimulus original, soit une version originale et l'une des quatre versions modifiées (20% pour chaque type de présentation). Lorsque la paire était dissimilaire, l'image originale pouvait être présentée en première ou en seconde position avec une fréquence égale. Les stimuli étaient tous inclus dans les 10 degrés centraux. Chaque essai était constitué d'une croix de fixation (200 ms), d'une première image, d'une croix de fixation (1000ms) et d'une seconde image (800ms). La tâche de la patiente était de signaler

<sup>2</sup>C'est à dire une double dissociation entre des patients pouvant distinguer deux images ne différant que par une rotation, mais pas celles différant par une symétrie horizontale, et d'autres pouvant distinguer deux images ne différant que par une symétrie horizontale mais pas celles différant par une rotation

si elle avait perçu une différence entre les deux images.

Dans une expérience contrôle, la même tâche a été effectuée avec des paires comprenant soit deux occurrences d'une image 'originale', ou deux images originales de la même catégorie.

Enfin, nous avons demandé à la patiente de lire les pseudo-mots à voix haute.

## b. Résultats:

La patiente montrait exactement le même pattern de résultats pour les trois types de stimuli non alphabétiques, qui ont donc été regroupés. Pour ces stimuli, la patiente pouvait sans difficulté décider s'il y avait eu un changement de couleur ou non ( $\chi^2(1)=90$  ;  $p<0.001$ ). En revanche, elle ne pouvait détecter s'il y avait eu un changement d'orientation, et déclarait systématiquement n'avoir perçu aucune différence entre les deux images ( $\chi^2(1)=0.008$ ). Pour les pseudo-mots, elle pouvait détecter les changements de couleur ( $\chi^2(1)=8.1$ ) quoique moins efficacement qu'avec les stimuli non alphabétiques. Comme pour les stimuli non-alphabétiques, elle ne pouvait détecter la présence d'une rotation ou non ( $\chi^2(1)<1$ ). De manière cruciale, en revanche, elle pouvait décider de façon performante si une symétrie horizontale avait eu lieu ou non ( $\chi^2(1)=30.3$ ).

Dans l'expérience contrôle, la patiente était performante avec les outils, les visages et les pseudo-mots ( $\chi^2(1)>7$ ), mais non avec les caractères chinois ( $\chi^2(1)<1$ ).

Enfin, dans la tâche de lecture, la patiente faisait, comme avec d'autres types de pseudo-mots, de nombreuses erreurs. Cependant, la patiente ne faisait jamais d'erreurs sur l'orientation du mot (e.g. boup - ->quod)

Type\Catégorie	Chinois	Outils	Visage	Pseudo-Mot
Identité	1\24	5\24	1\24	9\24
Couleur	4\24	3\24	0\24	3\24
Rotation 30°	23\24	23\24	24\24	21\24
Rotation 60°	18\24	20\24	20\24	21\24
Symétrie	21\24	23\24	23\24	2\24

Tableau 11 Nombre d'erreurs de la patiente en fonction de la transformation et de la catégorie.

## c. Discussion

En résumé, la patiente présentait une agnosie d'orientation pour la symétrie et pour la rotation, contrastant avec une capacité de reconnaissance des objets préservée, au moins pour les outils et pour les visages. Cette agnosie altérait sa capacité à percevoir l'orientation de mots inclinés. En revanche, en employant des pseudo-mots réversibles, la patiente repérait très facilement les changements d'orientation, alors qu'il s'agissait, formellement, de la même tâche que celle, si

difficile, proposée avec les images d'objets ou de visages.

La voie ventrale a pour fonction d'identifier les objets, ceci de façon invariante notamment pour leur orientation: une casserole est un seul et même objet, que l'on voit son manche à droite ou à gauche. La voie dorsale est nécessaire pour prendre en compte l'orientation, et, par exemple, saisir correctement le manche de la casserole.

En revanche, au cours de l'acquisition de la lecture, notre voie ventrale a appris que b, d, p et q et donc boup et quod étaient des objets distincts. Par conséquent, une lésion dorsale entraîne un déficit pour distinguer des objets ordinaires de leur image en miroir, mais non pour distinguer des mots de leur symétrique.

## **C. Approche d'imagerie cérébrale fonctionnelle**

### **1- Introduction**

Si le développement des techniques d'enregistrement intra-cranien de groupes de neurones ou même monocellulaire (Kreiman et al., 2000) pourrait apporter à relativement long terme un test explicite du modèle, nous pensons que certaines de ses prédictions sont d'ores et déjà indirectement testables à l'aide de techniques de neuro-imagerie fonctionnelles moins invasives.

Les principales prédictions de ce modèle s'organisent autour d'une triple affirmation:

- Les neurones du cortex occipito-temporal devraient montrer une spécificité acquise pour les fragments de mots issus de la langue du sujet alphabétisé.
- La taille des éléments préférés -lettres, bigrammes, courte chaîne- devrait augmenter progressivement le long d'un gradient occipito-temporal postéro-antérieur
- La taille des champs récepteurs de ces neurones devrait augmenter de manière concomitante, développant une invariance spatiale de plus en plus importante.

Ces points permettent de dégager un ensemble de prédictions qui ont déjà commencé à être testées en IRM fonctionnelle. (Dehaene et al 2004; Dehaene et al., 2001; Devlin, Jamison, Matthews, & Gonnerman, 2004). Bien que la taille des champs récepteurs des neurones soit bien en deçà de la résolution spatiale des machines d'IRM fonctionnelle, ce paramètre pourrait être évalué de manière indirecte à travers la méthode d'amorçage (Dehaene et Naccache 2001). Cette technique consiste à observer la diminution du signal BOLD lors de la répétition d'un même objet, par rapport à la présentation de deux objets différents. La résistance de cet effet de répétition suppression à des modifications de taille, de position ou d'autres paramètres pourrait permettre de caractériser les

propriétés structurelles moyennes des champs récepteurs d'un voxel donné. Supposons par exemple qu'un voxel montre un effet de répétition suppression lors de la présentation de la lettre 'A' à deux positions distantes d'1°. Un tel effet signifie qu'un sous-ensemble de neurones de ce voxel répond aux deux présentations, et que leur champ récepteur inclut donc ces deux positions.

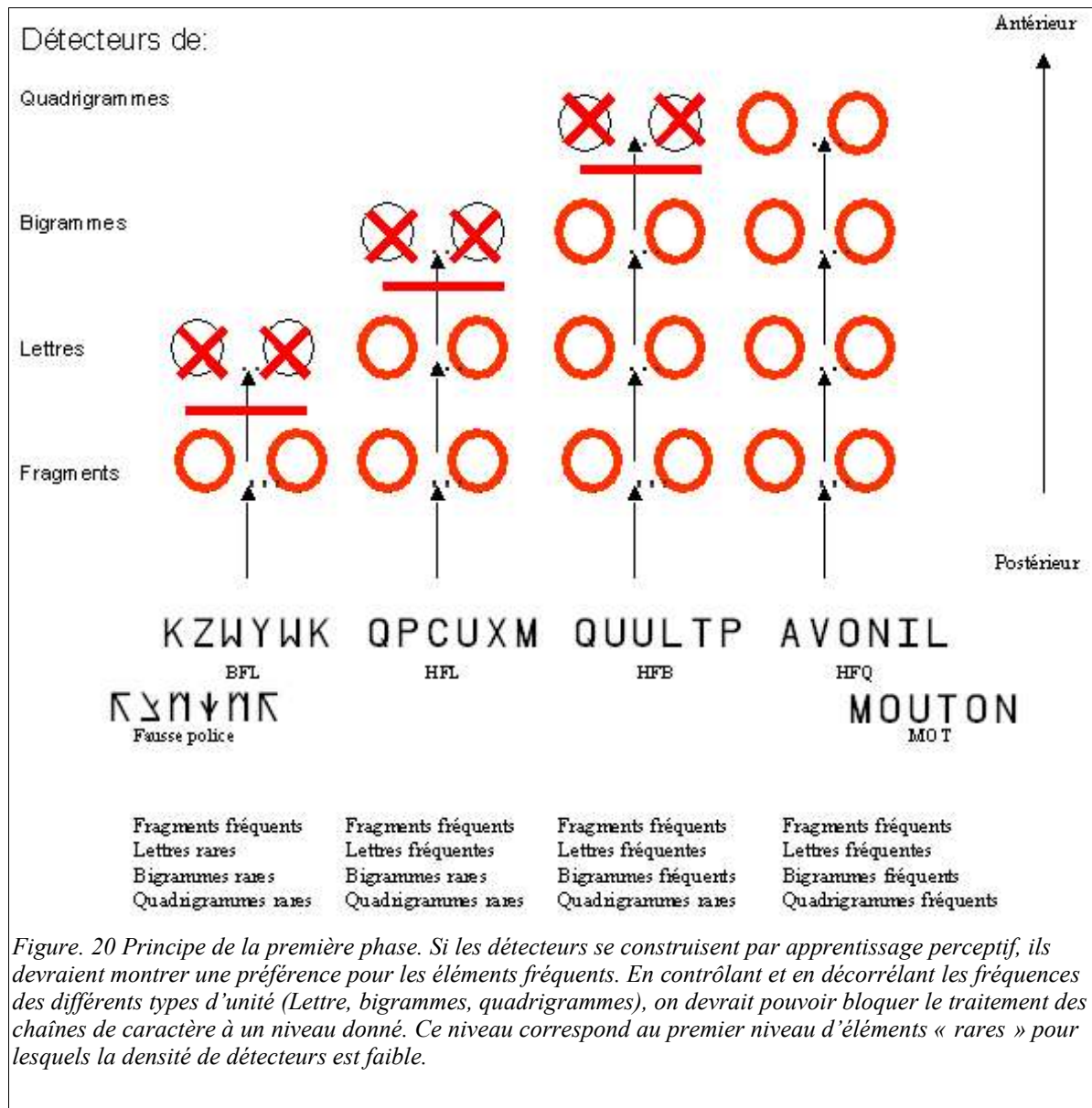
Comme mentionné plus haut, cette technique a ainsi révélé un effet de répétition suppression à travers un changement de casse au niveau d'une région du cortex occipito-temporal gauche latérale au cortex fusiforme, la VWFA (Dehaene et al 2001, Dehaene et al 2004). Mais cette région présentant une invariance pour la casse est elle même hiérarchiquement organisée (Dehaene et al 2004). Au niveau du cortex occipito-temporal postérieur ( $y=-68$ ), cet effet d'amorçage dépend strictement de la position des lettres : un simple déplacement d'un caractère suffit à briser cet effet d'amorçage. Cette région pourrait correspondre à la banque de détecteur de lettres supposée dans le modèle LCD. Plus en avant, ( $y=-56$ ), l'effet d'amorçage résiste à un déplacement d'une lettre, mais ne peut différencier un mot d'un anagramme par permutation circulaire des lettres (e.g. trefle REFLET). Cette région répond donc aux constituants communs d'un mot et de ses anagrammes, et correspondrait dans le modèle LCD aux détecteurs de bigrammes. Enfin, au niveau de la partie la plus antérieure de la VWFA ( $y=-48$ ), l'amorçage est plus fort pour le même mot répété que pour son anagramme. Cette région pourrait contenir les détecteurs de courtes chaînes ou de mots supposés dans le modèle LCD.

L'objectif de notre étude est de poursuivre la dissection fonctionnelle de la VWFA selon l'axe double constitué par le niveau d'abstraction des unités encodées et le niveau d'invariance spatiale, en se basant directement sur les prédictions du modèle LCD.

## **2. Description du paradigme**

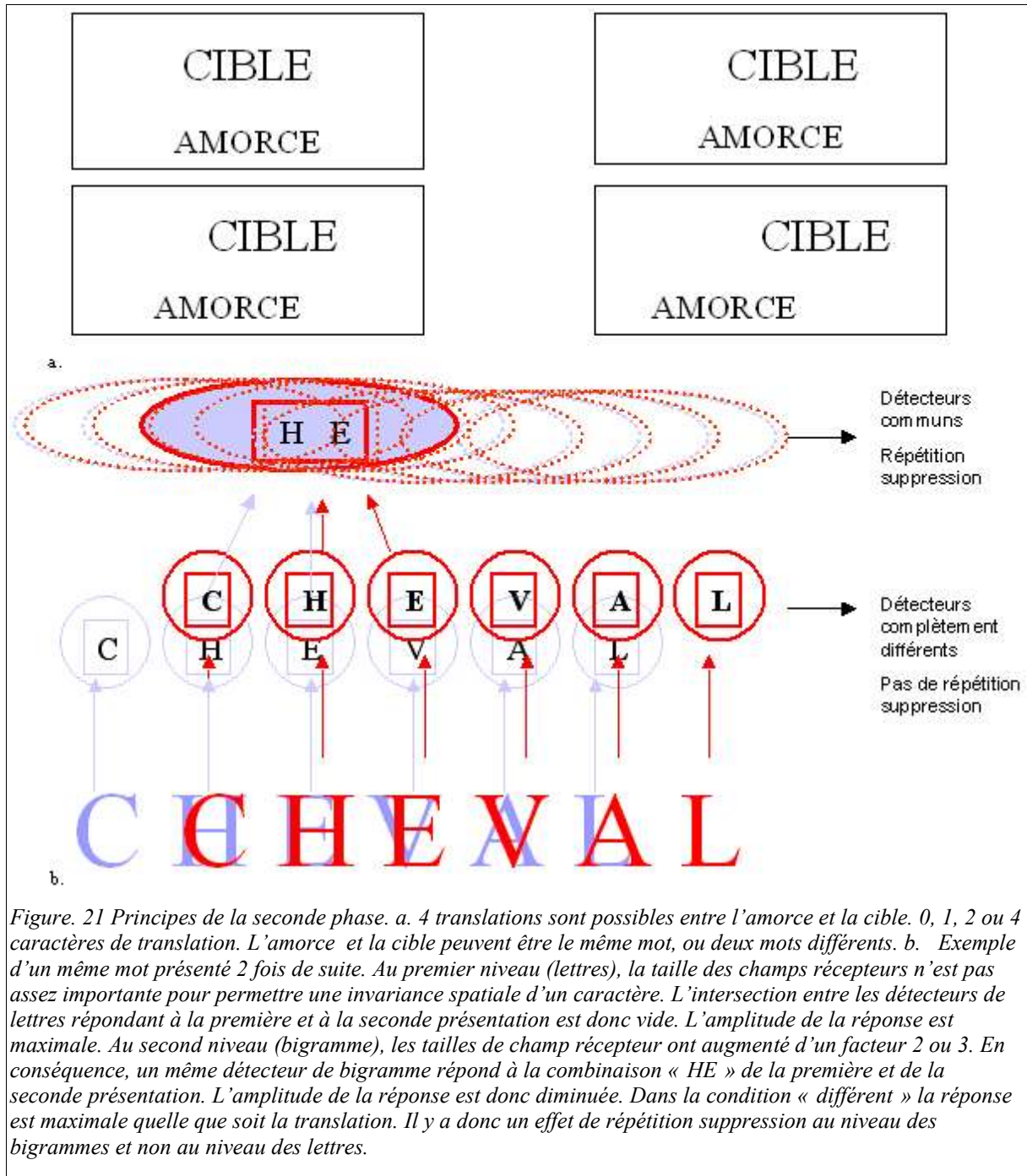
Le modèle LCD prévoit que les neurones du cortex occipito-temporal devraient montrer une spécificité acquise pour les fragments de mots issus de la langue du sujet alphabétisé. Schématiquement, plus un élément est fréquent, et plus sa représentation neuronale devrait être importante. Il devrait donc y avoir beaucoup de détecteurs de N-E, et peu ou pas de détecteurs de Z-F. Si cette hypothèse est juste, des unités rares devraient donc être peu traitées et peu ou mal reconnues. Le traitement d'une chaîne de caractères devrait donc être interrompu à un niveau fonction de la fréquence de ses éléments constitutifs (fig.20). Trivialement, du fait de la fréquence de ses fragments, et de la rareté de ses lettres, une chaîne de fausses lettres pourra être traitée par des détecteurs de fragments, mais n'activera que peu de détecteurs de lettres. De même, une chaîne constituée de lettres fréquentes mais de bigrammes rares sera bien traitée au niveau des détecteurs

de lettres, mais n'activera que peu de détecteurs de bigrammes. Le principe de la première phase de l'étude consiste à présenter des chaînes de caractères respectant progressivement les propriétés de vrais mots en terme de fréquence de lettres, de bigrammes et de quadrigrammes.



Le modèle LCD prévoit que le niveau d'invariance spatiale, corrélé à la taille des champs récepteurs, augmente progressivement le long du cortex occipito-temporal. Le principe de la deuxième phase de l'étude consiste à quantifier l'effet de répétition suppression en modifiant de manière paramétrique la distance spatiale entre l'amorce et la cible. A un niveau très rétinotopique, montrant peu d'invariance spatiale, une faible translation suffira à briser l'effet d'amorçage, car des neurones complètement différents répondront aux deux présentations successives. A l'inverse dans une région présentant une

grande invariance spatiale (i.e. Des champs récepteurs larges), les mêmes neurones devraient répondre à des présentations d'un même objet à des positions très différentes (Fig.21). La répétition suppression devrait donc montrer une grande résistance à la translation.



La corrélation des résultats de ces deux expériences devrait permettre d'associer un niveau d'abstraction et un niveau d'invariance spatiale, et ainsi de tester la validité des prédictions du modèle LCD.

### 3. Matériel et méthode

#### a- Phase 1

**Matériel:** Au moins trois niveaux de fréquence peuvent être définis à partir du modèle LCD: Fréquence des lettres, fréquence des bigrammes ouverts (que nous avons définie pour un bigramme A-B donné comme la somme des fréquences des séquences de lettre 'AB' et 'A \_ B', n'importe quelle lettre pouvant se substituer à « \_ ») et fréquence de courtes séquences de lettres (nous avons utilisé la fréquence des quadrigrammes).

Premièrement, nous avons calculé la fréquence de chacune de ces unités à partir d'une base lexicale (New et al 2001) (voir annexe pour définition de la fréquence). Puis, nous avons programmé un

générateur semi-aléatoire de pseudo-mots, contrôlant la fréquence des lettres, des bigrammes et des quadrigrammes. De manière cruciale, les fréquences de ces différentes unités, naturellement corrélées dans la langue française devaient être décorréées : exigence de décorrélation (Fig22.). De plus, deux catégories consécutives ne devaient différer que par la fréquence d'une des sous-unités (i.e. Lettres, bigrammes ou quadrigrammes) : exigence d'homogénéité. (Fig. 22)

	Fausse Police	BFL	HFL	HFB	HFQ	MOT
Fréquence des lettres	0	-	+	+	+	+
Fréquence des bigrammes	0	-	-	+	+	+
Fréquences des quadrigrammes	0	-	-	-	+	+
Fréquence de la chaîne	0	0	0	0	0	+

Figure. 22 Résumé des propriétés souhaitées des chaînes. Exigence de décorrélation, indiquée par le trait rouge : On souhaite décorréler la fréquence des différents types d'unité. Par exemple: En cartégorie HFL, haute fréquence de lettre mais basse fréquence de bigrammes. Exigence d'homogénéité On souhaite que les fréquences catégorisées comme hautes soient homogènes entre les différentes catégories. (par exemple, on veut la même fréquence de lettres entre la catégorie HFL et la catégorie HFQ). De même, on souhaite que les fréquences catégorisées comme basses soient homogènes entre les différentes catégories (Ex: même fréquence de bigrammes entre les catégories BFL et HFL). La fréquence des unités des mots est ajustée du mieux possible à celle de la catégorie HFQ.

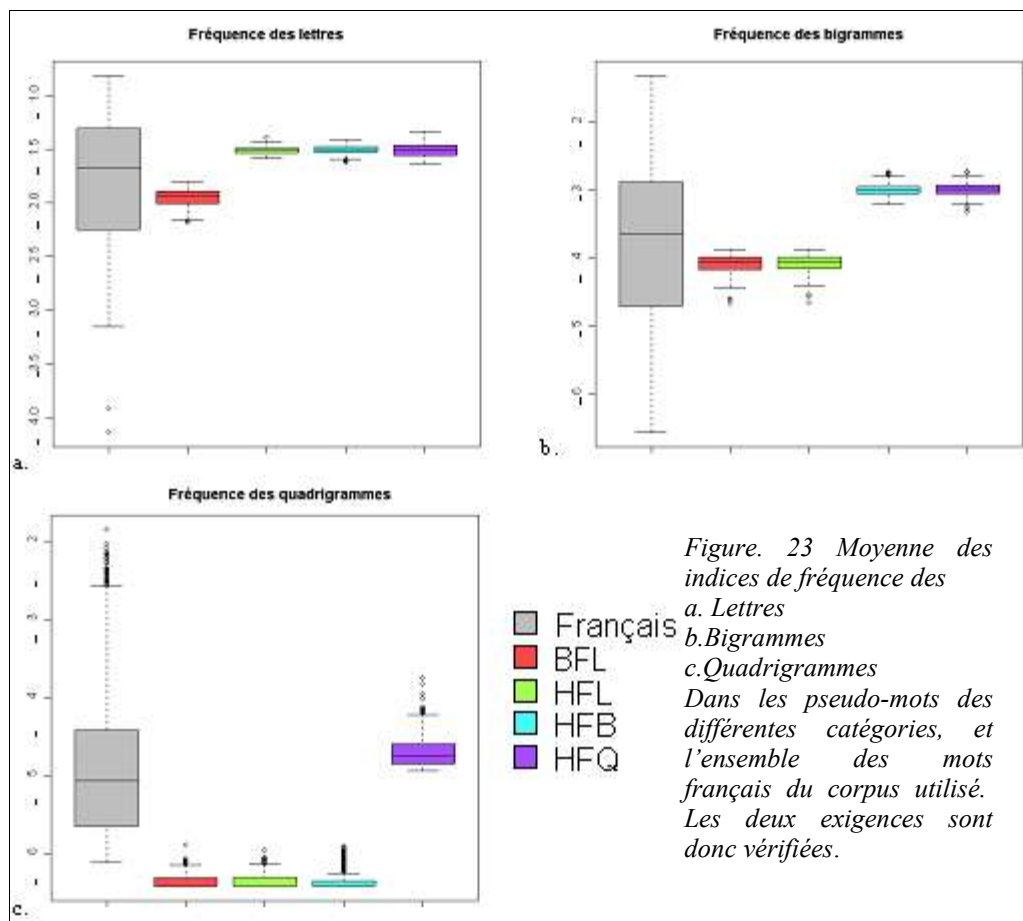
Quatre catégories de pseudo-mots ont été utilisées. Des pseudo-mots de basse fréquence de lettre (BFL : par exemple KZWYWK), de haute fréquence de lettre mais de basse fréquence de bigramme (HFL : par exemple QOADTQ), de haute fréquence de bigrammes mais de basse fréquence de quadrigramme (HFB : par exemple QUMBSS), et enfin de haute fréquence de quadrigramme (HFQ : par exemple AVONIL). (Voir annexe)



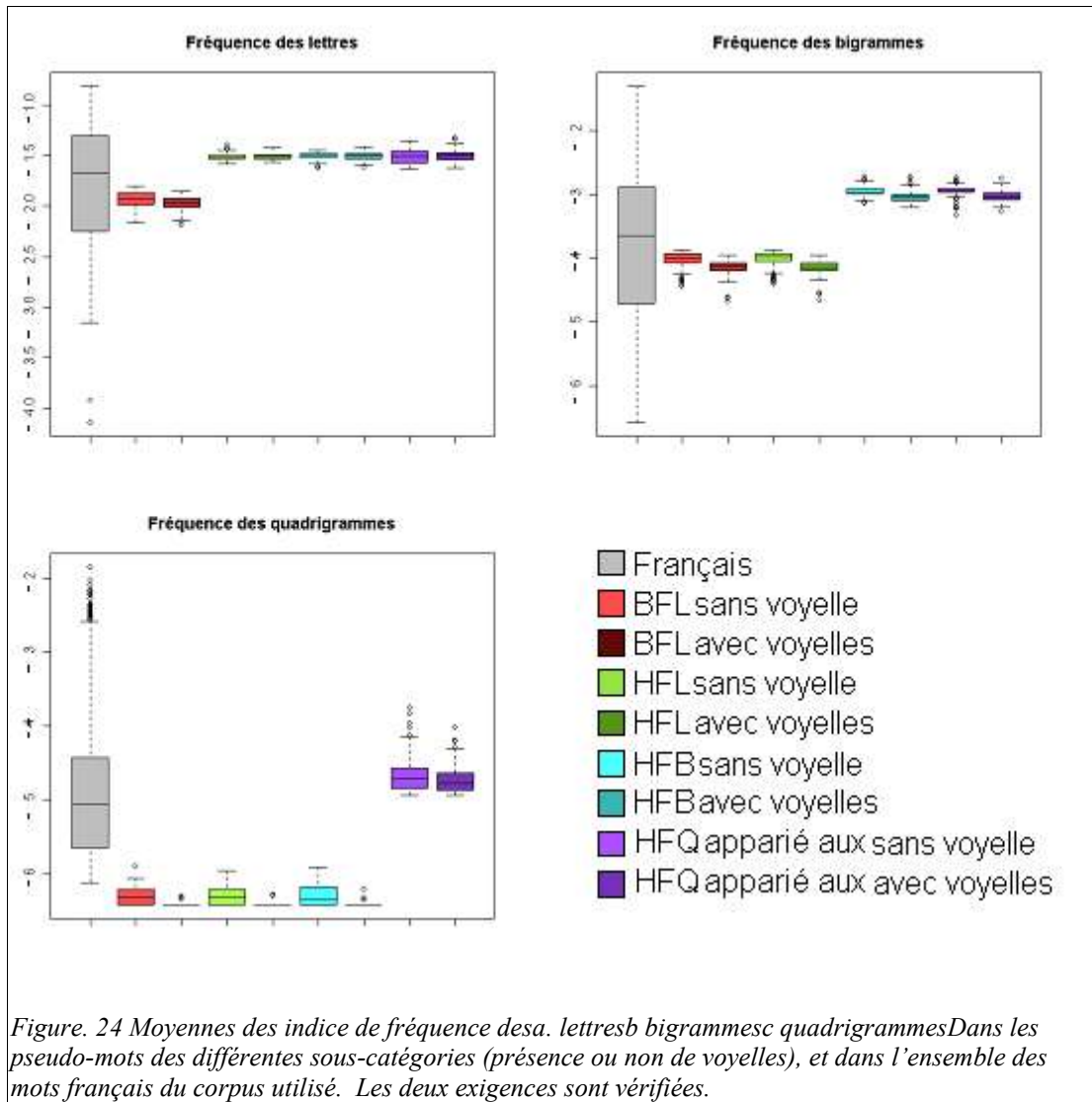
480 chaînes de 6 lettres ont ainsi été constituées pour chacune de ces catégories.

-La fréquence des lettres de la catégorie BFL était significativement inférieure à celle de chacune des trois autres catégories. La fréquence des bigrammes de chacune des deux catégories (BFL et HFL) était significativement inférieure à chacune de celle des deux autres (HFB et HFQ). Enfin, la fréquence de la 4e catégorie était significativement supérieure à celle de chacune des trois autres catégories. ( $P < 0.001$ ). L'exigence de décorrélation était donc respectée. (V fig.23)

-En revanche, il n'y avait pas de différence significative entre les fréquences de lettres des trois catégories supérieures (HFL, HFB et HFQ), pas de différence significative entre les fréquences des bigrammes des deux premières (BFL et HFL) ou des deux dernières (HFB et HFQ) et pas de différence significative entre les fréquences de quadrigrammes des trois premières catégories (BFL, HFL et HFB). L'exigence d'homogénéité était donc respectée. (V fig.23)



Pour les trois premières catégories (BFL, HFL et HFB), 240 chaînes étaient des chaînes de consonnes, et 240 comprenaient au moins une voyelle n'étant pas un Y. La quatrième catégorie était arbitrairement divisée en deux sous-ensembles. Le premier était apparié en fréquence aux trois premiers niveaux sans voyelles, et le second aux trois premiers niveaux avec voyelles. Ainsi que le montre la figure 24, chacun des deux sous-ensembles ainsi définis (BFL, HFL, HFB avec ou sans voyelle, et groupe HFQ apparié) respectait les exigences de décorrélation et d'homogénéité.



Une liste de 480 mots appariés de la façon la plus optimale possible avec la fréquence des lettres, des bigrammes et des quadrigrammes de la catégorie HFQ a été ajoutée. Cependant, cette dernière liste différait significativement sur ces paramètres de la liste HFQ.

Tous les mots étaient présentés dans une police à chasse fixe dessinée pour l'occasion.

Enfin, dans une dernière condition, les 480 pseudo-mots de la catégorie BFL, écrits dans une fausse police, ont été utilisés. Cette fausse police a été construite en recombinaison des fragments de notre police à chasse fixe, de façon à conserver une proximité maximale en terme de fragments et de complexité avec une vraie police de caractère (V annexe).

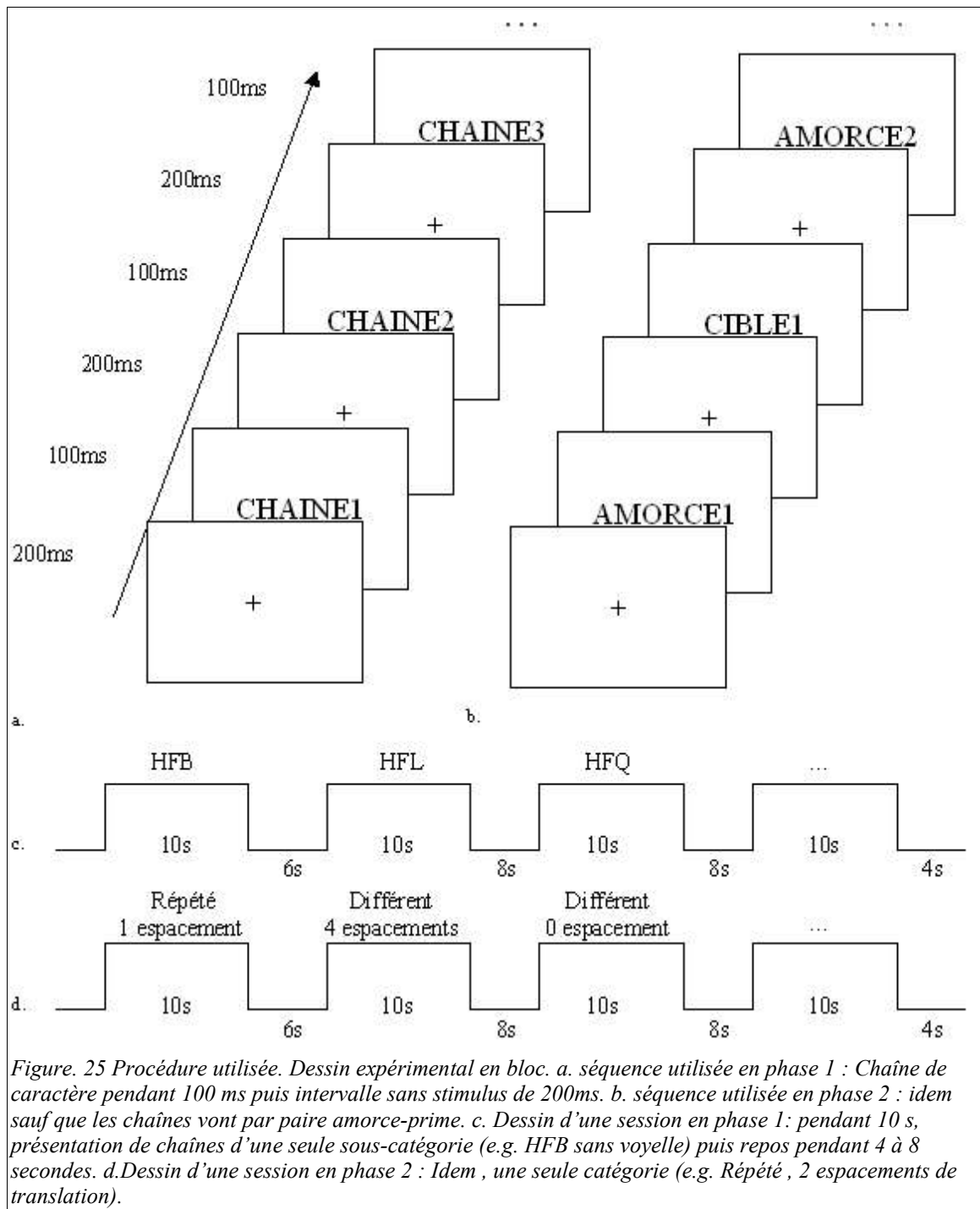
Fausse Police	BFL		HFL		HFB		HFQ		MOT
	Sans Voyelle	Avec voyelle	Sans Voyelle	Avec voyelle	Sans Voyelle	Avec voyelle	Apparié SV	Apparié AV	
ΦΛΣΠΓΠ	BVMHLW	AFVRZW	QCQSLN	LTJFPA	FNSGGR	HEEBUX	STYLON	JOLITH	PIQURE
ΚΚ-ΙΔΑΝ	KKTPRC	WKYNUN	TPDGFP	EQSDQN	HMBRCM	YMORNG	KADEME	KADEUR	ESSAYA
ΡΞΘΠΛΥ	GMDWNZ	BEJMZZ	LCJQST	UTLJPB	RSTGNZ	ZACIOU	BIJONC	BOLICH	FORMOL
ΑΑΚΕΑΧ	RVKFRX	FOYSKH	TPGFDP	QRQNV	DMPRCH	JOMBTT	LAYAGE	TYRANG	HANCHE
ΠΔϚϙϙΠ	HPSBBW	URGGWZ	NCJQNL	UTPJFS	JRBNTR	PLLVYE	SUFFIC	EFFICH	BOUGEA
ΚΑΥΑΓΥ	KRZNLZ	HOPYHX	TPXFSP	EQDQPM	FCLSRG	FOARUX	ZELANG	PUYAUX	MARTYR
ΞΔΠΞΠΑ	MPHMWR	ZJKIAN	MQCQNL	STFJVI	WNRMTR	CNESKI	SYSTIF	MOCHEZ	BAQUET
ΘΥϚΠΥΚ	DJSHZK	XHODOW	TPJRFP	NUQCPX	NSFFRG	UFOORX	ZANCHE	PYRANG	FLEGME
ΡΠΞΡΑΦ	GWMGRB	IPKYNZ	LMQQSD	SIFQQL	MBCRHT	CYAGNS	MYSTIF	WHISSE	TRAHIT
ΚΠΓϚΓΥ	KHLSJZ	WBHLEW	NQNTJP	EPMJVP	PRGNSJ	PPRHIF	ZEROBE	ROBABY	ESSUYE
ΞΘΛΦΧΠ	MDNBXW	OKGYDU	QSMDQL	CUBQFT	DMMTRH	BEVAOX	PLICHY	KHEINT	BIJOUX
ΚΑΥ-ΙϚΠ	KVZTSH	JAIWVF	TNPJFP	EQPLVP	FSGRSB	RNGURY	AGONZE	FUYAUX	MEDIUM
ΘΥΡΕΛΠ	DJGFNW	COKXBC	VQQLSR	NAJFPD	JPRCNM	BFAIOM	PHYSTI	WINSON	TAPOTA
ΚΑΠΠΠΘ	KRCHHQ	KALYUW	NBPXDT	TOQMVV	HFMRMS	LCURCY	WRONDA	PUCHEZ	ELIXIR
ϚϙϙΡΓΠ	SBGLW	TOKBKE	TJQSLP	EXDBDP	JNTGRG	HMESTZ	HYSAGE	SYNDIA	PAYSAN
ΚΞΠΠΠΘ	KMHCHD	FALWYP	NPCXDD	TOQSJF	CHDMNR	WOVIAI	FOURQL	GRICHU	EGORGE
ΠΧΧΑϚΑ	WXXVSN	DHBIZK	TLJSQS	EGIBQP	TNRRSK	MSUGEZ	ZINGEA	DEVABO	IMPACT
ΥΚΦΔΥΑ	JKBPZR	GOSWYG	LTCPIX	NLJFPU	CMBLRG	HOLYNT	HYDRAL	KILLOU	LOYERS
ΠΠΠΡΓΘ	CHUGLD	UNKIZZ	TJPQSR	SEBJQR	JHNNST	BBERUX	STINCK	HYSAND	CRYPTTE
ΚϚΧϚΔΥ	KSXSPZ	ACHWMY	NPXSFD	APQCFP	LMBGRR	ALYGNO	GLOREZ	MOYEUX	MOUCHE

Tableau. 12 Exemples de chaînes utilisées dans la première phase.

**Procédure :** Nous avons utilisé un dessin expérimental en bloc. Chacune des 4 sessions d'IRM était constituée de 24 blocs de 20 chaînes, séparés par un intervalle de 4, 6 ou 8 secondes. Les 20 mots d'un même bloc appartenaient à l'une des 10 catégories. (Fig. 25) Les mots étaient présentés 100 ms, séparés par un intervalle de 200ms. Deux chaînes successives ne présentaient aucune lettre partagée. Un point de fixation matérialisant le centre de l'écran restait continuellement affiché.

Dans la moitié des blocs, l'un des mots, aléatoirement choisi, était remplacé par une chaîne de dièses. Les sujets devaient fixer le point central, et appuyer sur un bouton avec l'indexa droit à chaque chaîne de dièses. Nous avons enregistré les mouvements oculaires pour contrôler l'absence de saccades.

Tous les mots étaient présentés en majuscule, dans une police à chasse fixe dessinée pour cette expérience (ou en fausse police pour la condition FP) , 22 pts, gris sur fond noir.



**Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle :** Nous avons utilisé un système corps entier 3 teslas (Bruker, Allemagne), et une séquence echo-planar d'écho de gradient sensible au niveau d'oxygénation du sang (effet BOLD). (40 coupes axiales de 3mm d'épaisseur, TR=2.4 secondes). Les données ont été traitées avec SPM2, incluant correction du signal pour la distorsion, le temps d'acquisition de coupe et le mouvement ; normalisation ; lissage ; modélisation par combinaison linéaire de fonctions résultant de la convolution d'une fonction d'hémodynamique canonique et de sa dérivée temporelle avec la série temporelle des différents types de stimuli ; et analyse de groupe avec la variable sujet en facteur aléatoire.

## b. Phase 2

**Matériel :** 8 listes de 180 mots de 6 lettres, sans lettres répétées, comparables en fréquence ( $P > 0.1$ ) ont été préparées. Pour chaque liste, une permutation minimisant le nombre de lettres communes des mots appariés a été calculée. (Moyenne du nombre de lettre répétée  $< 1$  pour chaque liste).

Les mots étaient présentés par paire. Dans la condition 'répété', chaque paire était constituée de deux occurrences du même mot. Dans la condition 'différent', les paires étaient constituées d'un mot, et de son mot apparié dans la liste. Par conséquent, le même nombre de mots était présenté dans ces deux conditions, seul l'appariement différait.

Par ailleurs, une translation était effectuée entre les deux mots de la paire. Cette translation pouvait être de 0 caractère (absence de translation), 1 caractère, 2 caractère ou 4 caractères. (Fig. 21)

Chaque liste était aléatoirement attribuée à l'une des huit conditions résultantes pour chacun des sujets. Au final, les mots pouvaient être présentés à 8 positions rétinienne différentes. Dans chaque condition, toutes les positions rétinienne étaient équiprobables. (voir fig. 26)

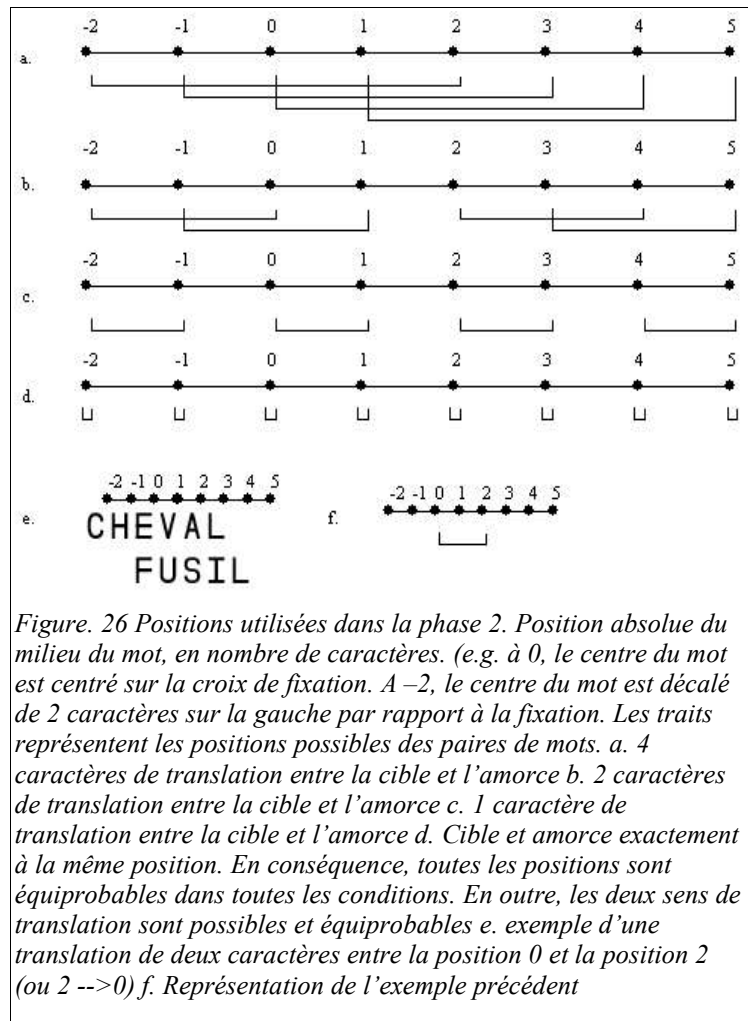


Figure. 26 Positions utilisées dans la phase 2. Position absolue du milieu du mot, en nombre de caractères. (e.g. à 0, le centre du mot est centré sur la croix de fixation. A -2, le centre du mot est décalé de 2 caractères sur la gauche par rapport à la fixation. Les traits représentent les positions possibles des paires de mots. a. 4 caractères de translation entre la cible et l'amorce b. 2 caractères de translation entre la cible et l'amorce c. 1 caractère de translation entre la cible et l'amorce d. Cible et amorce exactement à la même position. En conséquence, toutes les positions sont équiprobables dans toutes les conditions. En outre, les deux sens de translation sont possibles et équiprobables e. exemple d'une translation de deux caractères entre la position 0 et la position 2 (ou 2 -->0) f. Représentation de l'exemple précédent

**Procédure.** Le même dessin expérimental que celui décrit précédemment a été utilisé (i.e., blocs de 10 paires de mots. Chaque mot étant présenté 100 ms, et séparé du suivant par un intervalle de 200ms). (fig. 25)

**Imagerie.** Les mêmes paramètres d'imagerie ont été utilisés.

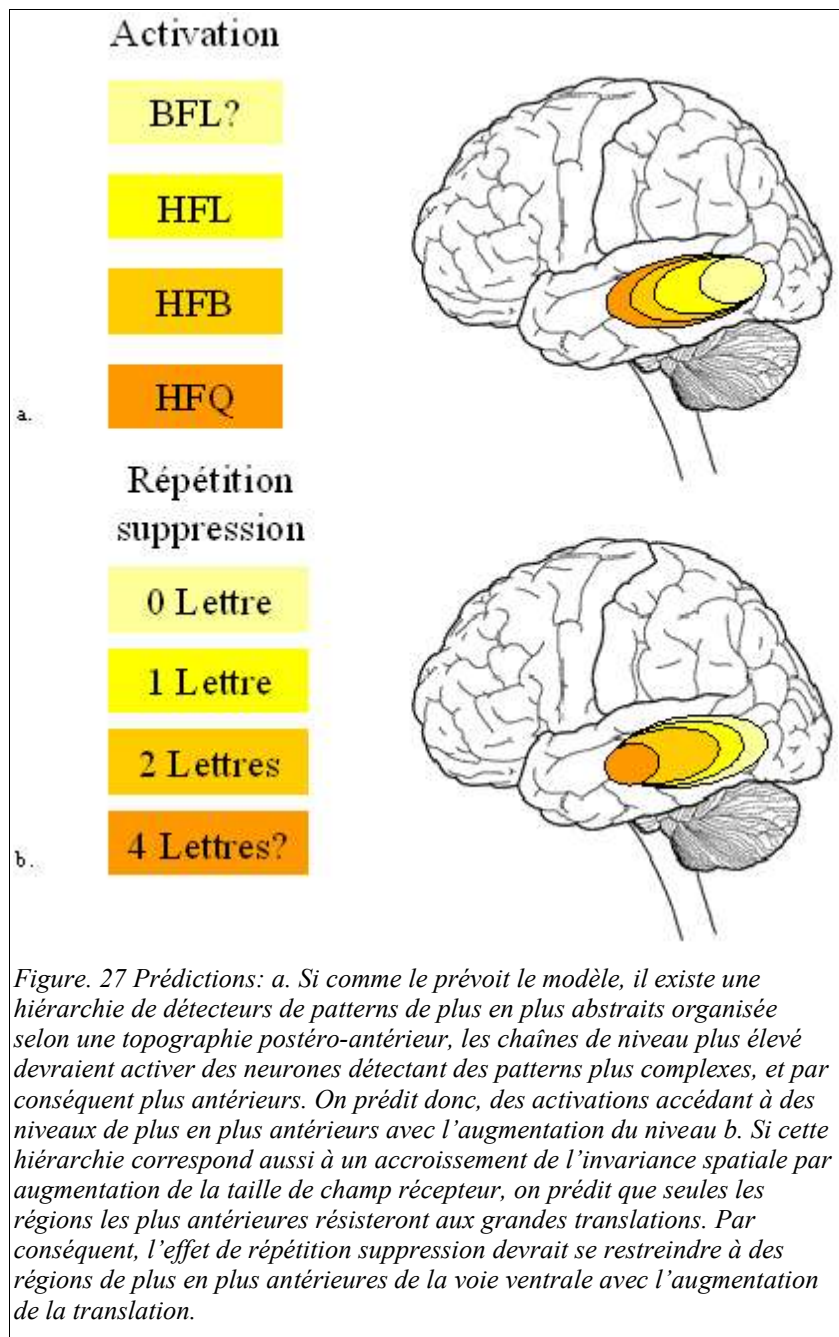
# Prédictions

## a- Phase 1

Si le champ récepteur des neurones du cortex occipito-temporal se construit par apprentissage perceptif, la quantité de neurones détectant une unité donnée devrait être fonction de la fréquence de cette unité. Par conséquent, un élément rare, peu représenté au niveau neuronal, devrait être moins bien traité. Le traitement d'une chaîne de caractères devrait donc être interrompu à un niveau fonction de la fréquence de ses éléments constitutifs (fig. 20). Une chaîne de fausses lettres sera donc traitée jusqu'au niveau des fragments, tandis qu'une chaîne de lettres fréquentes ayant des bigrammes rares sera traitée jusqu'au niveau des lettres.

Dans le modèle LCD, la

taille des éléments préférés -fragment, lettres, bigrammes, quadrigramme- augmente progressivement le long d'un gradient occipito-temporal postéro-antérieur. Par conséquent, on prédit des activations incluant des régions de plus en plus antérieures de la VWFA. (Fig. 26). Le contraste entre les mots et les pseudo-mots de type HFQ pourrait par ailleurs révéler des activations sémantiques. Cette première phase pourrait permettre d'isoler et de localiser anatomiquement les différents niveaux du modèle LCD.



## **b -Phase 2**

Un effet de répétition est attendu chaque fois qu'un ensemble de neurones répond aux deux présentations d'une paire, c'est-à-dire essentiellement à chaque fois que l'unité détectée par le neurone se trouve dans son champ récepteur avant et après la translation. Si la taille de champ récepteur des neurones du cortex occipito-temporal augmente bien progressivement le long d'un gradient occipito-temporal postéro-antérieur, le niveau d'invariance spatiale devrait augmenter le long de ce même gradient. Une translation d'un caractère devrait donc casser la répétition suppression dans les régions où la taille des champs récepteurs est globalement inférieure à 1 caractère, en le préservant aux niveaux ultérieurs. Symétriquement, chaque niveau de translation supplémentaire devrait casser un niveau d'invariance spatiale supplémentaire, en préservant la répétition suppression aux niveaux ultérieurs. Si l'invariance spatiale suit le gradient décrit dans le modèle LCD, l'augmentation de la translation devrait casser l'effet de répétition suppression dans des régions de plus en plus antérieures de la voie ventrale. (fig.26)

## **c. Phase 3**

La première phase associe une région anatomique à un niveau d'abstraction, c'est à dire à un type d'unité -lettre, bigramme, quadrigramme- préféré. La seconde phase associe une région anatomique à un niveau d'invariance spatiale, ce dernier étant lui-même corrélé à une taille de champ récepteur. La confrontation, si possible chez le même sujet, des données de la première et de la seconde expérience devrait donc permettre d'associer une taille de champ récepteur à un type de détecteur donné. Si le modèle LCD est juste, une hiérarchie de neurones sensibles à des patterns de plus en plus abstraits dans un champ récepteur de plus en plus large s'organisant le long d'un gradient occipito-temporal postéro-antérieur devrait être retrouvée.

## **4. Résultats**

Cette étude est actuellement en cours, et seuls quelques résultats pilotes, non présentés ici, ont pu à ce jour être analysés.

## IV discussion générale

Un faisceau d'arguments multidisciplinaires converge vers l'idée que la reconnaissance invariante des mots est effectuée par un ensemble de neurones spécialisés, principalement situés dans une sous-région du cortex occipito-temporal dénommée l'aire de la forme visuelle des mots. Dans ce travail, nous avons essayé de contribuer à l'élaboration d'un modèle des processus mis en oeuvre lors de cette reconnaissance invariante, basé sur une hiérarchie de détecteurs locaux de combinaisons de plus en plus abstraites : le modèle LCD.

L'esprit de ce modèle consiste à unifier des concepts issus de la psychologie cognitive, de la neuro-imagerie fonctionnelle ou de la neuropsychologie au sein d'une description relativement précise et neurophysiologiquement plausible du système ventral de lecture, dans le cadre théorique d'un recyclage neuronal. Dans une perspective neurophysiologique, il semble en effet peu probable que le code neural des mots soit aussi rationnel et optimisé pour la lecture que, par exemple, celui qu'une approche computationnelle construirait. Un ensemble diverse et redondant de neurones spécialisés, résultant de modifications minimales du système visuel du primate nous apparaît plus probable. Cette hypothèse ouvre sur la possibilité d'utiliser la quantité considérable d'informations provenant de l'étude du cortex visuel du macaque pour progresser dans l'étude de la lecture. Plus généralement, le raisonnement conduisant à l'hypothèse du recyclage neuronal semble pertinent pour l'ensemble des fonctions culturelles récentes, et pourrait apporter de nouvelles perspectives dans leur étude et dans les modélisations qui en sont faites.

Cependant, d'un point de vue strictement neurophysiologique, il nous apparaît comme important de bien garder à l'esprit que le modèle LCD n'est au mieux qu'une vision simpliste et très idéalisée du type d'encodage pouvant se produire au sein du système biologique ventral. Par exemple, si le modèle LCD explique pourquoi les bigrammes semblent un compromis optimal entre les lettres et les morphèmes, il semblerait absurde d'affirmer de manière péremptoire l'absence de détecteurs de trigrammes très fréquents, comme « EAU ». De plus, l'organisation de la VWFA d'un sujet reflète très certainement l'histoire personnelle de ce sujet, et son rapport à la lecture.

Par conséquent, ce modèle doit plutôt être considéré comme une base de travail permettant de dégager un ensemble de points falsifiables et de prédictions qualitatives ou quantitatives testables tant sur le plan de la psychologie cognitive ou de la neuro-imagerie fonctionnelle que de la neuropsychologie. En d'autres mots, appuyer notre démarche expérimentale sur un cadre théorique volontairement simpliste mais aisément falsifiable nous apparaît comme le meilleur moyen de faire évoluer notre socle d'hypothèses vers une compréhension plus détaillée des mécanismes de la lecture.



Nous avons commencé à tester quelques unes de ces prédictions et obtenu un degré de corrélation entre les prédictions et les données expérimentales très encourageant.. Nous avons montré qu'au-delà d'un certain seuil, l'espacement entre les lettres induisait une chute des capacités de lecture, et l'apparition d'un effet de longueur. Nous avons supposé que cet effet de longueur était la conséquence d'un mode de lecture sériel d'origine pariétale. Puis, nous avons montré que des lésions pariétales, affectant relativement peu la lecture de mots isolés dans des conditions normales, altérait de façon majeure la lecture précisément dans les conditions induisant un effet de longueur. Nous avons alors interprété ce résultat comme la confirmation de la nature dorsale de la lecture sérielle. Enfin, à l'aide de l'IRMf, nous avons commencé à adresser une vérification des principes de base du modèle, et notamment la topographie de son implémentation cérébrale. En particulier, l'adaptation à l'IRMf du classique paradigme psychophysique d'habituation nous apparaît du plus grand intérêt. La possibilité, grâce à cette méthode d'amorçage, d'adresser à la neuro-imagerie humaine des questions classiquement dédiées à l'enregistrement unicellulaire pourrait permettre une dissection extrêmement fine du code neural de la lecture, du système visuel et des fonctions cérébrales en général. Cependant, de plus amples investigations seront très certainement nécessaires pour pouvoir infirmer, confirmer ou plus certainement faire évoluer la structure générale décrite dans le modèle LCD.

## V Références

1. Allison, T., McCarthy, G., Nobre, A. C., Puce, A., & Belger, A. (1994). Human extrastriate visual cortex and the perception of faces, words, numbers and colors. *Cerebral Cortex*, 5, 544-554.
2. Allison, T., Puce, A., Spencer, D. D., & McCarthy, G. (1999). Electrophysiological studies of human face perception. I: Potentials generated in occipitotemporal cortex by face and non-face stimuli. *Cereb Cortex*, 9(5), 415-430.
3. Ans, B., Carbonnel, S., & Valdois, S. (1998). A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychol Rev*, 105(4), 678-723.
4. Beauregard, M., Chertkow, H., Bub, D., Murtha, S., Dixon, R., & Evans, A. (1997). The neural substrate for concrete, abstract, and emotional word lexica: A positron emission tomography study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 441-461.
5. Behrmann, M., Nelson, J., & Sekuler, E. B. (1998). Visual complexity in letter-by-letter reading: "pure" alexia is not pure. *Neuropsychologia*, 36(11), 1115-1132.
6. Biederman, I., & Cooper, E. E. (1991). Evidence for complete translational and reflectional invariance in visual object priming. *Perception*, 20(5), 585-593. Binder, J. R., & Mohr, J. P. (1992). The topography of callosal reading pathways. A case-control analysis. *Brain*, 115, 1807-1826.

7. Brincat, S. L., & Connor, C. E. (2004). Underlying principles of visual shape selectivity in posterior inferotemporal cortex. *Nat Neurosci*, 7(8), 880-886.
8. Brunswick, N., McCrory, E., Price, C. J., Frith, C. D., & Frith, U. (1999). Explicit and implicit processing of words and pseudowords by adult developmental dyslexics: A search for Wernicke's Wortschatz? *Brain*, 122, 1901-1917.
9. Bub DN, Lewine J. Different modes of word recognition in the left and right visual fields. *Brain Lang* 1988; 33: 161-88.
10. Büchel, C., Price, C. J., & Friston, K. (1998). A multimodal language region in the ventral visual pathway. *Nature*, 394(6690), 274-277.
11. Changeux, J. P. (1983). *L'homme neuronal*. Paris: Fayard.
12. Chung S. (2002) The Effect of Letter Spacing on Reading Speed in Central and Peripheral Vision *Investigative Ophthalmology and Visual Science*. 2002;43:1270-1276.
13. Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M. A., et al. (2000). The visual word form area: Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, 123, 291-307.
14. Cohen L, Lehericy S, Chochon F, Lemer C, Rivaud S, Dehaene S. Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain* 2002; 125: 1054-69.
15. Cohen, L., Martinaud, O., Lemer, C., Lehéricy, S., Samson, Y., Obadia, M., et al. (2003). Visual word recognition in the left and right hemispheres: Anatomical and functional correlates of peripheral alexias. *Cerebral Cortex*, 13, 1313-1333.
16. Cohen, L., Henry, C., Dehaene, S., Martinaud, O., Lehericy, S., Lemer, C., et al. (2004). The pathophysiology of letter-by-letter reading. *Neuropsychologia*, 42(13), 1768-1780.
17. Cohen, L. and Dehaene, S. (2004) Specialization within the ventral stream: the case for the visual word form area. *Neuroimage* 22 (1), 466-476
18. Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychol Rev*, 108(1), 204-256.
19. Cornell. (1985). Spontaneous mirror-writing in children. *Can J Exp Psychol*, 39, 174-179.
20. Damasio, A. R., & Damasio, H. (1983). The anatomic basis of pure alexia. *Neurology*, 33, 1573-1583.
21. Davis, C. J., & Bowers, J. S. (2004). What do letter migration errors reveal about letter position coding in visual word recognition? *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 30(5), 923-941.
22. Davis C, Coltheart M. Paying attention to reading errors in acquired dyslexia. *Trends Cogn Sci* 2002; 6: 359.
23. Dawkins, R. (1996). *The Blind Watchmaker: Why the Evidence of Evolution Reveals a Universe Without Design*. New York: W.W.Norton & Co.
24. Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends Cogn Sci*, submitted.
25. Dehaene, S. (2005). Pre-emption of human cortical circuits by numbers and language: The "neuronal recycling" hypothesis. In S. Dehaene, J. R. Duhamel, M. Hauser & G. Rizzolatti (Eds.), *From monkey brain to human brain* (Vol. in press). Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

26. Dehaene, S., Jobert, A., Naccache, L., Ciuciu, P., Poline, J. B., Le Bihan, D., et al. (2004). Letter binding and invariant recognition of masked words: behavioral and neuroimaging evidence. *Psychol Sci*, 15(5), 307-313.
27. Dehaene, S., Le Clec'H, G., Poline, J. B., Le Bihan, D., & Cohen, L. (2002). The visual word form area: a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport*, 13(3), 321-325.
28. Dehaene S, Naccache L, Cohen L, Bihan DL, Mangin JF, Poline JB, et al. Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nat Neurosci* 2001; 4: 752-8.
29. Dehaene S, Naccache L, Le Clec'H G, Koechlin E, Mueller M, Dehaene-Lambertz G, van de Moortele PF, Le Bihan D. Imaging unconscious semantic priming. *Nature*. 1998 Oct 8;395(6702):597-600.
30. Dejerine, J. (1892). Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Mémoires de la Société de Biologie*, 4, 61-90.
31. Devlin, J. T., Jamison, H. L., Matthews, P. M., & Gonnerman, L. M. (2004). Morphology and the internal structure of words. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 101(41), 14984-14988.
32. Fiez, J. A., Balota, D. A., Raichle, M. E., & Petersen, S. E. (1999). Effects of lexicality, frequency, and spelling-to-sound consistency on the functional anatomy of reading. *Neuron*, 24(1), 205-218.
33. Gauthier, I. (2000). What constrains the organization of the ventral temporal cortex? *Trends Cogn Sci*, 4(1), 1-2.
34. Gauthier, I., Tarr, M. J., Moylan, J., Skudlarski, P., Gore, J. C., & Anderson, A. W. (2000). The fusiform "face area" is part of a network that processes faces at the individual level. *J. Cogn. Neurosci.*, 12(3), 495-504.
35. Gould, S. J. (1992). *The Panda's Thumb: More Reflections in Natural History*. New York: W.W. Norton & Co.
36. Gould, S. J., & Lewontin, R. C. (1979). The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm: a critique of the adaptationist programme. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, 205 (1161), 581-598.
37. Gould, S. J., & Vrba, E. S. (1982). Exaptation: A missing term in the science of form. *Paleobiology*, 8(4-15).
38. Grainger, J., & Jacobs, A. M. (1996). Orthographic processing in visual word recognition: a multiple read-out model. *Psychol Rev*, 103(3), 518-565. Grainger, J., & Whitney, C. (2004). Does the human mind read words as a whole? *Trends Cogn Sci*, 8(2), 58-59.
39. Hanley, J. R., & Kay, J. (1996). Reading speed in pure alexia. *Neuropsychologia*, 34(12), 1165-1174.
40. Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (1999). Phonology, reading acquisition, and dyslexia: insights from connectionist models. *Psychol Rev*, 106(3), 491-528.
41. Hasson, U., Levy, I., Behrmann, M., Hendler, T., & Malach, R. (2002). Eccentricity bias as an organizing principle for human high-order object areas. *Neuron*, 34(3), 479-490.
42. Humphreys, G. W., Evett, L. J., & Quinlan, P. T. (1990). Orthographic processing in visual word identification. *Cognitive Psychology*, 22, 517-560.
43. Johnson, N. F., & Pugh, K. R. (1994). A cohort model of visual word recognition. *Cognit Psychol*, 26(3), 240-346.

44. Koriat A, Norman J. (1985) Reading rotated words. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.* 1985
45. Kreiman, G., Koch, C., & Fried, I. (2000). Category-specific visual responses of single neurons in the human medial temporal lobe. *Nat Neurosci*, 3(9), 946-953.
46. Lavidor M. An examination of the lateralized abstractive/form specific model using MiXeD-CaSe primes. *Brain Cogn* 2002; 48: 413-7.
47. Lavidor M, Babkoff H, Faust M. Analysis of standard and non-standard visual word format in the two hemispheres. *Neuropsychologia* 2001a; 39: 430-9.
48. Lavidor M, Ellis AW. Word length and orthographic neighborhood size effects in the left and right cerebral hemispheres. *Brain Lang* 2002; 80: 45-62.
49. Lavidor M, Babkoff H, Faust M. (2001) Analysis of standard and non-standard visual word format in the two hemispheres. *Neuropsychologia*. 2001;39(4):430-9.
50. Legge GE, Ahn SJ, Klitz TS, Luebker A. Psychophysics of reading--XVI. The visual span in normal and low vision. *Vision Res* 1997; 37: 1999-2010.
51. Logothetis, N. K., & Pauls, J. (1995). Psychophysical and physiological evidence for viewer-centered object representations in the primate. *Cereb Cortex*, 5(3), 270-288.
52. Logothetis, N. K., Pauls, J., Bulthoff, H. H., & Poggio, T. (1994). View-dependent object recognition by monkeys. *Curr Biol*, 4(5), 401-414.
53. Malach, R., Levy, I., & Hasson, U. (2002). The topography of high-order human object areas. *Trends Cogn Sci*, 6(4), 176-184.
54. 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, 375-407.
55. McMonnies, C. W. (1992). Visuo-spatial discrimination and mirror image letter reversals in reading. *J Am Optom Assoc*, 63(10), 698-704.
56. Marinkovic, K., Dhond, R. P., Dale, A. M., Glessner, M., Carr, V., & Halgren, E. (2003). Spatiotemporal dynamics of modality-specific and supramodal word processing. *Neuron*, 38(3), 487-497.
57. Miyashita, Y. (1988). Neuronal correlate of visual associative long-term memory in the primate temporal cortex. *Nature*, 335(6193), 817-820.
58. Montant, M., & Behrmann, M. (2000). Pure alexia. *Neurocase*, 6, 265-294.
59. Mozer, M. C. (1987). Early Parallel Processing in Reading: A Connectionist Approach. In M. Coltheart (Ed.), *Attention and Performance XII: The psychology of reading*. (pp. 83-104). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
60. Naccache L, Dehaene S. (2001) The priming method: imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobes. *Cereb Cortex*. 2001 Oct;11(10):966-74.
61. 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.
62. Nobre, A. C., Allison, T., & McCarthy, G. (1994). Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature*, 372(6503), 260-263.
63. Pammer, K., Hansen, P. C., Kringelbach, M. L., Holliday, I., Barnes, G., Hillebrand, A., et al. (2004). Visual word recognition: the first half second. *Neuroimage*, 22(4), 1819-1825.

64. Paulesu, E., McCrory, E., Fazio, F., Menoncello, L., Brunswick, N., Cappa, S. F., et al. (2000). A cultural effect on brain function. *Nat Neurosci*, 3(1), 91-96.
65. Patterson, K., & Kay, J. (1982). Letter-by-letter reading: Psychological descriptions of a neurological syndrome. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 34A, 411-441.
66. Perea, M., & Lupker, S. J. (2003). Does jugde activate COURT? Transposed-letter similarity effects in masked associative priming. *Mem Cognit*, 31(6), 829-841.
67. Peressotti, F., & Grainger, J. (1999). The role of letter identity and letter position in orthographic priming. *Percept Psychophys*, 61(4), 691-706.
68. Petersen, S. E., Fox, P. T., Snyder, A. Z., & Raichle, M. E. (1990). Activation of extrastriate and frontal cortical areas by visual words and word-like stimuli. *Science*, 249, 1041-1044
69. Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. (1996). Understanding normal and impaired word reading: computational principles in quasi-regular domains. *Psychol Rev*, 103(1), 56-115.
70. RA Poldrack, JE Desmond, GH Glover and JD Gabrieli (1998) The neural basis of visual skill learning: an fMRI study of mirror reading *Cerebral Cortex*, Vol 8, 1-10, Copyright © 1998 by Oxford University Press
71. Priftis K, Rusconi E, Umiltà C, Zorzi M. (2003) Pure agnosia for mirror stimuli after right inferior parietal lesion. *Brain*. 2003 Apr;126(Pt 4):908-19.
72. Russell A. Poldrack and John D. E. Gabrieli (2001) Characterizing the neural mechanisms of skill learning and repetition priming *Brain*, Vol. 124, No. 1, 67-82, January 2001
73. Polk, T. A., & Farah, M. J. (2002). Functional MRI evidence for an abstract, not perceptual, word-form area. *J Exp Psychol Gen*, 131(1), 65-72.
74. Price, C. J., Wise, R. J. S., & Frackowiak, R. S. J. (1996). Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords. *Cerebral Cortex*, 6, 62-70.
75. Puce, A., Allison, T., Asgari, M., Gore, J. C., & McCarthy, G. (1996). Differential sensitivity of human visual cortex to faces, letterstrings, and textures: a functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience*, 16, 5205-5215.
76. Riesenhuber, M., & Poggio, T. (1999). Hierarchical models of object recognition in cortex. *Nature Neuroscience*, 2, 1019-1025.
77. Rees, G., Russell, C., Frith, C. D., & Driver, J. (1999). Inattention blindness versus inattentional amnesia for fixated but ignored words. *Science*, 286, 2504-2507.
78. Riddoch J. Neglect and the peripheral dyslexias. *Cognitive Neuropsychology* 1990; 7: 369-389.
79. Rizzo M, Vecera SP. Psychoanatomical substrates of Balint's syndrome. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2002; 72: 162-78.
80. Rollenhagen, J. E., & Olson, C. R. (2000). Mirror-image confusion in single neurons of the macaque inferotemporal cortex. *Science*, 287(5457), 1506-1508.
81. Rolls, E. T. (2000). Functions of the primate temporal lobe cortical visual areas in invariant visual object and face recognition. *Neuron*, 27(2), p205-218.
82. Salmelin, R., Service, E., Kiesilä, P., Uutela, K., & Salonen, O. (1996). Impaired visual word processing in dyslexia revealed with magnetoencephalography. *Annals of Neurology*, 40, 157-162.
83. Sigman, M., & Gilbert, C. D. (2000). Learning to find a shape. *Nat Neurosci*, 3(3), 264-269.

84. Simos, P. G., Fletcher, J. M., Foorman, B. R., Francis, D. J., Castillo, E. M., Davis, R. N., et al. (2002). Brain activation profiles during the early stages of reading acquisition. *Journal of Child Neurology*, 17(3), 159-163.
85. Schoonbaert, S., & Grainger, J. (2004). Letter position coding in printed word perception: Effects of repeated and transposed letters. *Language and Cognitive Processes*, 19, 333-367.
86. Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychol Rev*, 96(4), 523-568.
87. Suzuki, K., Yamadori, A., Endo, K., Fujii, T., Ezura, M., & Takahashi, A. (1998). Dissociation of letter and picture naming resulting from callosal disconnection. *Neurology*, 51, 1390-1394.
88. Tarkiainen, A., Helenius, P., Hansen, P. C., Cornelissen, P. L., & Salmelin, R. (1999). Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain*, 122(Pt 11), 2119-2132.
89. Terepocki, M., Kruk, R. S., & Willows, D. M. (2002). The incidence and nature of letter orientation errors in reading disability. *J Learn Disabil*, 35(3), 214-233.
90. Tsunoda, K., Yamane, Y., Nishizaki, M., & Tanifuji, M. (2001). Complex objects are represented in macaque inferotemporal cortex by the combination of feature columns. *Nat Neurosci*, 4(8), 832-838.
91. Turnbull OH, McCarthy RA. (1996) When is a view unusual? A single case study of orientation-dependent visual agnosia. *Brain Res Bull*. 1996;40(5-6):497-502; discussion 502-3.
92. Turnbull OH, Beschin N, Della Sala S. (1997) Agnosia for object orientation: implications for theories of object recognition. *Neuropsychologia*. 1997 Feb;35(2):153-63.
93. Turnbull OH. (1997) A double dissociation between knowledge of object identity and object orientation. *Neuropsychologia*. 1997 Apr;35(4):567-70.
94. Turnbull OH, Della Sala S, Beschin N. (2002) Agnosia for object orientation: naming and mental rotation evidence. *Neurocase*. 2002;8(4):296-305.
95. Wagner, A. D., Schacter, D. L., Rotte, M., Koutstaal, W., Maril, A., Dale, A. M., et al. (1998). Building memories: remembering and forgetting of verbal experiences as predicted by brain activity. *Science*, 281(5380), 1188-1191.
96. Warrington, E. K., & Shallice, T. (1980). Word-form dyslexia. *Brain*, 103, 99-112. Weekes, B. (1997). Differential effects of number of letters on word and nonword naming latency. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 50A, 439-456.
97. Whitney, C. (2001). How the brain encodes the order of letters in a printed word: the SERIOL model and selective literature review. *Psychon Bull Rev*, 8(2), 221-243.
98. Whitney, C., & Lavidor, M. (2004). Why word length only matters in the left visual field. *Neuropsychologia*, 42(12), 1680-1688.
99. Xu, B., Grafman, J., Gaillard, W. D., Ishii, K., Vega-Bermudez, F., Pietrini, P., et al. (2001). Conjoint and extended neural networks for the computation of speech codes: the neural basis of selective impairment in reading words and pseudowords. *Cereb Cortex*, 11(3), 267-277.
100. Zorzi, M., Houghton, G., & Butterworth, B. (1998). Two routes or one in reading aloud? A connectionist dual-process model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 1131-1161.

# VI Annexes

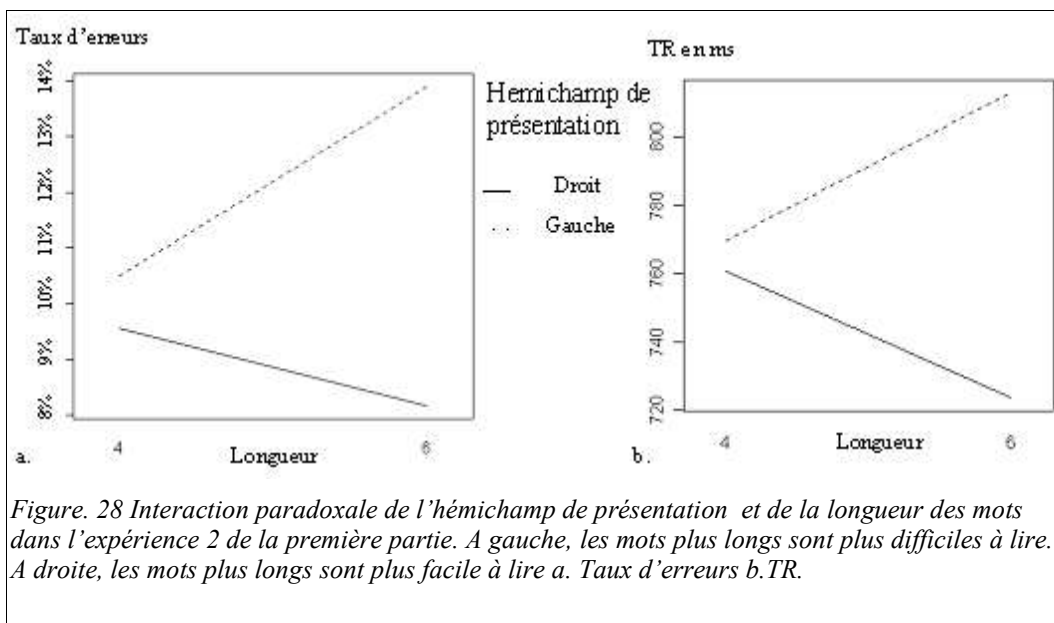
## 1- anti effet de longueur

Détails des surprenant effets de longueur retrouvés dans l'expérience 2

**Résultats** (Fig.28) : Taux d'erreurs : A gauche, les taux d'erreurs augmentaient avec la longueur ( $F(1,17)=13.50$ ;  $P<0.01$ ). Il y avait une interaction de la longueur et du mode ( $F(1,17)=5.62$  ;  $P=0.03$ ). L'effet de longueur était significatif en mode E ( $F(1,17)=20,21$ ), et augmentait marginalement avec le niveau ( $F(4,68)=2.04$ ;  $P=0.098$ ). En mode D, l'effet de longueur était marginalement significatif ( $P=0.1$ ).

A droite, il n'y avait pas d'effet de longueur ni d'interaction impliquant ce facteur.

Temps de réaction : A gauche, les TR augmentaient avec la longueur ( $F(1,16)=24.16$ ;  $P<0.001$ ). Il y avait une interaction de la longueur, du mode et du niveau ( $F(4,66)=5,47$ ;  $P<0.001$ ). L'effet de longueur était présent en mode E comme en mode D (respectivement  $F(1,16)=13.63$ ;  $P<0.01$  et  $F(1,17)=4.48$ ;  $P=0.049$ ), mais était plus important en mode E ( $F(1,16)=5.42$  ;  $P=0.03$ ), et augmentaient avec le niveau ( $F(4,66)=2.91$  ;  $P=0.02$ ). A droite, les TR diminuaient avec la longueur ( $F(1,17)=15.02$ ;  $P<0.01$ ).



**Discussion** : Dans cette expérience, l'effet de longueur n'était pas pleinement pertinent. En effet,

l'extrémité médiale des mots de six lettres était alignée sur la croix de fixation, tandis que celle des mots de 4 lettres ne l'était pas. Dans l'hémichamp gauche, la première lettre (la plus médiale) de tous les mots était donc justifiée, mais la dernière (la plus latérale) ne l'était pas. Par conséquent, seule une faible interaction avec la longueur des mots était attendue. A l'inverse, dans l'hémichamp droit, la dernière lettre (la plus médiale) de tous les mots était justifiée, tandis que la première (la plus latérale) ne l'était pas. Par conséquent, une forte interaction avec la longueur était attendue. Cette différence entre les mots de 4 lettres et les mots de 6 lettres était bien plus importante en mode E qu'en mode D. Ce point pourrait rendre compte d'un effet plus marqué de la longueur pour les mots espacés. Au final, ces différences entre les mots de 4 lettres et les mots de 6 lettres peuvent expliquer les effets de longueur retrouvés dans l'expérience 2. Cette explication sera vérifiée par un sous-ensemble des résultats de l'expérience 4.

**Confirmation** : Pour confirmer notre explication des anti-effets de longueur retrouvés lors de la deuxième expérience, nous avons testé la présence d'un effet de longueur pour les mots de 4 lettres et de 6 lettres espacés de manière comparable. Ainsi, il y avait plus d'erreurs pour des mots de 6 lettres espacés d'un facteur 2.4 que pour des mots de 4 lettres espacés d'un facteur 2.7 dans l'hémichamp gauche comme dans l'hémichamp droit (respectivement  $F(1,11)=24.80; P<0.001$  et  $F(1,11)=16.67; P<0.001$ ). Pour les temps de réaction, cet effet était marginalement significatif dans l'hémichamp gauche et significatif dans l'hémichamp droit (respectivement  $F(1,11)=4.71; P=0.052$  et  $F(1,11)=14.06; P<0.001$ ). Les effets paradoxaux de la longueur retrouvés dans l'expérience 2 correspondaient donc bien à des artefacts de présentation. Pour un espacement égal et sans biais de présentation, les mots plus longs sont plus difficiles à lire.

## Les différents groupes d'alexie

Les alexies, ou troubles de la lecture acquis à la suite de lésions cérébrales, sont divisées en alexie « périphériques » et alexies « centrales ». Les alexies périphériques affectent l'analyse visuelle des mots écrits, tandis que les alexies centrales affectent des étapes ultérieures du processus de lecture, comme l'accès au lexique ou à la phonologie. Les variétés d'alexie périphériques reflètent naturellement l'organisation du système visuel cérébral.

On peut ainsi distinguer :

- (1) Des troubles résultant de simples amputations du champ visuel par lésion du cortex primaire.  
(Cohen et al 2003)
- (2) Des alexies résultant de lésions de la voie ventrale occipito-temporale (c'est à dire essentiellement l'alexie pure))



(3) Des alexies résultant de lésions de la voie occipito-pariétales.

Trois principaux syndromes ont été isolés au sein des alexies « dorsales » : l'alexie spatiale du syndrome de Balint (Rizzo & Vecera 2002) , l'alexie attentionnelle (Davis & Coltheart 2002), et l'alexie de la négligence (Riddoch, 1990). Schématiquement, ces désordres reflètent des déficits affectant la localisation des objets dans l'espace et la distribution de l'attention visuelle. Naturellement, ces troubles peuvent être associés de manière diverse, et difficiles à distinguer, chez un patient donné.

## 2. Détail de la génération des pseudo-mots

Par convention, ^ est le caractère de « début de chaîne », et \$ le caractère « fin de chaîne ».

Pour chaque unité i (lettre, bigramme ou quadrigramme), nous avons calculé un indice  $FREQ(i)$  défini par :

$FREQ(i) = \log(F(i))$  avec :

$$F(i) = \sum_{n \in N} (a(i,n) * f(n)) / S(i)$$

où N représente l'ensemble des mots de la langue française de fréquence supérieure à 2/million (New et al 2001)

a(i, n) représente le nombre d'occurrence de l'élément i dans le mot n (par exemple, a(A, ^PARAPLUIE\$)=2 ; a(P-R, ^PARAPLUIE\$)=1 ; ; a(E-\$, ^PARAPLUIE\$)=1 ; a(P-E, ^PARAPLUIE\$)=0

f(n) représente la fréquence en occurrence par million du mot n

S(i) représente la somme de F sur l'ensemble des unités de même taille que i (par exemple, la somme des F des bigrammes pour le bigramme P-R)

Les bigrammes d'un mot étaient définis comme étant soit les lettres contiguës ou séparées d'un seul caractère (e.g. ^C CH; HI; IE; EN; N\$; ^H; CI; HE; IN; E\$; pour CHIEN)

$FREQ(i)$  est donc d'autant plus grand que la fréquence i est grande. Par convention l'indice  $FREQ$  des éléments n'apparaissant pas dans le lexique (comme le quadrigramme ZFPM) correspondait au  $FREQ$  d'un élément apparaissant une fois dans un mot de fréquence 1 par million.

A partir de cette base de données, notre algorithme de génération utilisait: (fig.29)

Initialisation par le caractère « début de chaîne puis

Pour les pseudo-mots de type BFL, probabilité de tirer la lettre  $i$  proportionnelle à  $1/\text{FREQ}(i)$

Pour les pseudo-mots de type HFL probabilité de tirer la lettre  $i$  sachant la lettre précédente «  $h$  » proportionnelle  $\text{FREQ}(i)/\text{FREQ}(hi)$

Pour les pseudo-mots de type HFB, tirage des 2 premières lettres en ( $\text{FREQ}(hi)$ ), puis probabilité de tirer la lettre  $i$  sachant les trois caractères précédents  $fgh$  en  $(\text{FREQ}(hi)/\text{FREQ}(fghi))$

Pour les pseudo-mots de type HFQ, tirage du premier quadrigramme en  $\text{FREQ}$  de ce quadrigramme, puis probabilité de tirer la lettre  $i$  sachant

les trois caractères précédents  $fgh$  en ( $\text{FREQ}(fghi)$ )

Les pseudo-mots devaient être des pseudo-mots de 6 lettres contenant au moins 4 lettres différentes n'étant ni un mot, ni l'homophone d'un mot. Par ailleurs, un critère arbitraire sur la fréquence était appliqué:

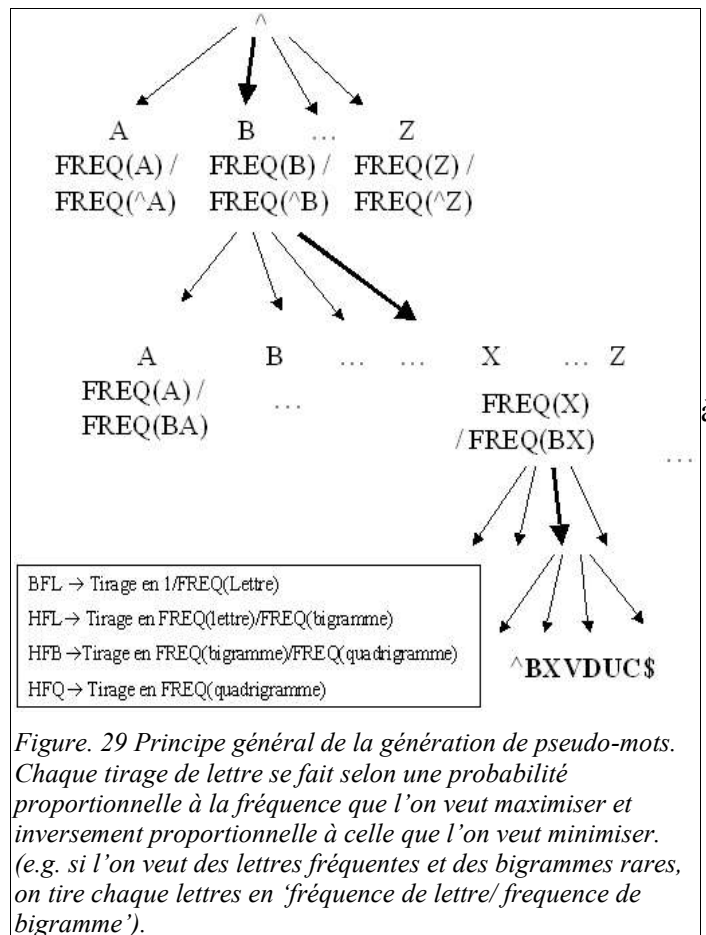
Pour un type d'unité (lettre, bigramme quadrigramme) donné  $U$ , deux seuils ont été calculés à partir de la base de données:

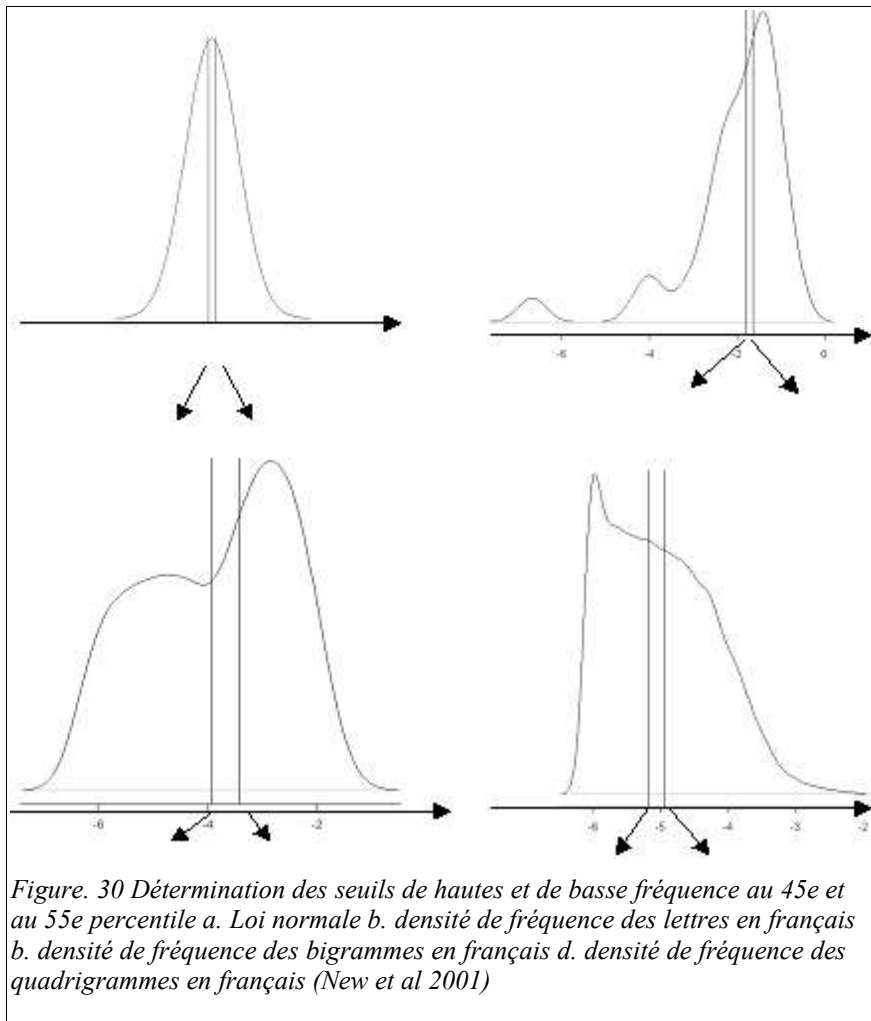
Un seuil de basse fréquence, correspondant au 45e percentile de  $\text{FREQ}$  sur  $N$ .

Un seuil de haute fréquence, correspondant au 55e percentile de  $\text{FREQ}$  sur  $N$ .

Pour être acceptée comme de basse fréquence, la moyenne des  $\text{FREQ}$  des unités d'un pseudo-mot devait être inférieure au seuil de basse fréquence. A l'inverse, pour être acceptée comme de haute fréquence, la moyenne des  $\text{FREQ}$  des unités d'un pseudo-devait être supérieure au seuil de haute fréquence. (fig. 30)

Ce premier algorithme permettait de souscrire à l'exigence de décorrélation. Enfin, un second algorithme sélectionnait des sous-ensembles répondant à l'exigence d'homogénéité).





### 3. Polices utilisées

Police à chasse fixe:

VOIX AMBIGUE D UN COEUR QUI AU ZEPHYR PREFERE  
LES JATTES DE KIWIS

Fausse police:

ΛΩΗΧ ΛΖΦΗΡΥΓ Η ΨΛ ΟΩΓΥΑ ΘΥΗ ΛΥ ΣΓΠΥΑ  
ΡΑΓΡΓΡ ΓΓΓ ΓΛΓΓΓ ΓΓ ΓΥΥΥ ΓΥΥΥ

Police miroir:

QUI AU ZEPHYR PREFERE LES JATTES DE KIWIS  
VOIX AMBIGUE D UN COEUR